

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Hodnocení řezné plochy po dělení vysokorychlostním  
abrazivním vodním paprskem**

Evaluation of Cut Surface after Cutting by High-Speed Abrasive  
Water Jet

Student:	Ladislav Chrobák
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Libor Sitek, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce:	Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ladislav Chrobák**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení řezné plochy po dělení vysokorychlostním abrazivním  
vodním paprskem  
Evaluation of Cut Surface after Cutting by High-Speed Abrasive Water  
Jet**

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Základy technologie vysokorychlostního vodního paprsku.
3. Metody hodnocení topografie povrchů.
4. Experimentální ověření vlivu jednoho řezného parametru vodního paprsku na topografii řezného povrchu.
5. Analýza a interpretace naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v trieskovém obrábění*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [3] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [4] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.

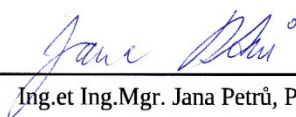
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

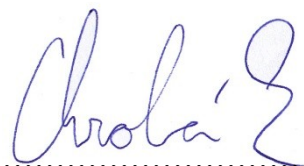


  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

**Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 1. května 2014

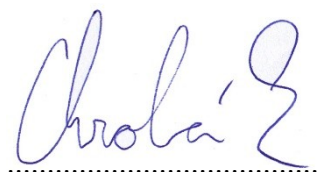


.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla, školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 1. května 2014



Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Ladislav Chrobák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Karolíny Světlé č. p. 1358/26

Havířov – Podlesí, okr. Karviná

736 01

**Poděkování:**

Děkuji Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracování mé bakalářské práce. Dále chci poděkovat zaměstnancům Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i. za pomoc při experimentech a poskytnutí literárních podkladů. Poděkování patří také Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za poskytnutí rad důležitých pro zpracování práce.

**ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

CHROBÁK, L. *Hodnocení řezné plochy po dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 51s. Vedoucí práce: Sitek, L.

Bakalářská práce se zabývá hodnocením řezné plochy nerezové oceli po řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první - teoretické části práce jsou popsány některé nekonvenční metody obrábění a pak vzájemně porovnány podle vybraných parametrů při řezání materiálu. Druhá část práce je zaměřena na experiment, který porovnává plochy po řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem při různě nastavených parametrech. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky experimentu (vzhled, drsnost a kvalita řezného povrchu) v souvislosti s parametry paprsku. Detailní údaje o experimentu a dosažené výsledky včetně bližší specifikace použitých zařízení jsou uvedeny v příloze.

**ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

CHROBÁK, L. *Evaluation of Cut Surface after Cutting by High-Speed Abrasive Water Jet: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 51 p. Thesis head: Sitek, L.

The following bachelor's thesis focuses on the evaluation of cutting surfaces of stainless steel after the cutting process of the abrasive water jet. The work is divided in two major parts. The first part is theoretically oriented and several non-conventional machining methods are presented. They are consequently compared according to selected parameters during material cutting. In the second part, which is oriented on experiment, surfaces created by the cutting using the abrasive water jet with differently set parameters are compared. In the conclusion, results of the experiment, such as the cutting surface appearance, roughness and quality, are analysed and evaluated according to the jet parameters. Detailed information about the experiment together with obtained results is presented in the Annex.

## Obsah

Seznam použitých zkratk.....	9
Úvod.....	10
1 Nekonvenční metody obrábění.....	11
1.1 Elektroerozivní obrábění (Electro-Discharge Machining, EDM).....	12
1.2 Elektro chemické obrábění (Electro-Chemical Machining, ECM) .....	13
1.3 Chemické obrábění (Chemical Machining, CM).....	14
1.4 Obrábění laserem (Laser Beam Machining, LBM) .....	15
1.5 Obráběním plazmou (Plasma Beam Machining, PBM) .....	17
1.6 Obrábění elektronovým paprskem (Electron Beam Machining, EBM) .....	18
1.7 Obrábění iontovým paprskem (Ion Beam Machining, IBM) .....	19
1.8 Obrábění ultrazvukem (Ultrasonic Machining, USM) .....	20
1.9 Obrábění proudem vzduchu s abrazivem (Abrasive Jet Machining, AJM)....	21
1.10 Stereolitografie.....	22
2 Obrábění vodním a abrazivním vodním paprskem (Water Jet Machining, WJM; Abrasive Water Jet Machining, AWJM) .....	23
2.1 Vznik úkosu: .....	25
2.2 Aplikace WJM a AWJM: .....	26
2.3 Popis zařízení nařezání vodním paprskem.....	27
3 Porovnání jednotlivých nekonvenčních metod.....	28
4 Experimentální část .....	29
4.1 Zkušební materiál .....	29

4.2	Hodnocení topografie povrchu .....	30
4.3	Měření topografie povrchu .....	32
4.4	Experimentální postup .....	33
5	Výsledky experimentů .....	34
5.1	Zkušební vzorek č. 1 .....	35
5.2	Zkušební vzorek č. 2 .....	36
5.3	Zkušební vzorek č. 3 .....	37
5.4	Zkušební vzorek č. 4 .....	38
5.5	Zkušební vzorek č. 5 .....	39
5.6	Zkušební vzorek č. 6 .....	40
5.7	Zkušební vzorek č. 7 .....	41
5.8	Zkušební vzorek č. 8 .....	42
5.9	Porovnání vzorků .....	43
6	Diskuse výsledků .....	46
	Závěr .....	47
7	Použitá literatura .....	48
8	Seznam příloh .....	52



**Seznam použitých zkratk**

Zkratka	Význam
<b><i>CNC</i></b>	Počítačově číslicové řízení
<b><i>CAD</i></b>	Počítačem podporované projektování
<b><i>RTG</i></b>	Rentgen
<b><i>NMO</i></b>	Nekonvenční metody obrábění
<b><i>EDM</i></b>	Elektroerozivní obrábění
<b><i>ECM</i></b>	Elektrochemické obrábění
<b><i>CM</i></b>	Chemické obrábění
<b><i>LBM</i></b>	Obrábění laserem
<b><i>PBM</i></b>	Obrábění paprskem plazmy
<b><i>PAM</i></b>	Obrábění obloukem plazmy
<b><i>EBM</i></b>	Obrábění elektronovým paprskem
<b><i>IBM</i></b>	Obrábění iontovým paprskem
<b><i>USM</i></b>	Obrábění ultrazvukem
<b><i>RUM</i></b>	Rotační ultrazvukové obrábění
<b><i>AJM</i></b>	Obrábění proudem vzduchu a abraziva
<b><i>AFM</i></b>	Obrábění proudem vzduchu
<b><i>WJM</i></b>	Obrábění vodním paprskem
<b><i>AWJM</i></b>	Obrábění abrazivním vodním paprskem
<b><i>IJM</i></b>	Obrábění ledovým paprskem
<b><i>ASJ</i></b>	Suspenzní vodní paprsek
<b><i>AWJ</i></b>	Abrazivní vodní paprsek

## Úvod

Strojírenství má v hospodářství České republiky zásadní význam, jelikož zajišťuje pro ostatní odvětví hospodářství výrobní techniku (stroje). V současnosti se v různých odvětvích průmyslu zvyšuje poptávka po moderních a kvalitních materiálech. Zároveň je kladen velký důraz na kvalitu výroby, zkrácení obráběcích a manipulačních časů a snížení nákladů spojených s výrobou. Mnohé moderní materiály lze jen těžko, anebo nelze vůbec obrobit klasickými způsoby obrábění. S výhodou lze však použít tzv. nekonvenční metody obrábění (NMO), které zpravidla využívají jiných fyzikálních principů, než klasické třískové obrábění [3], [22].

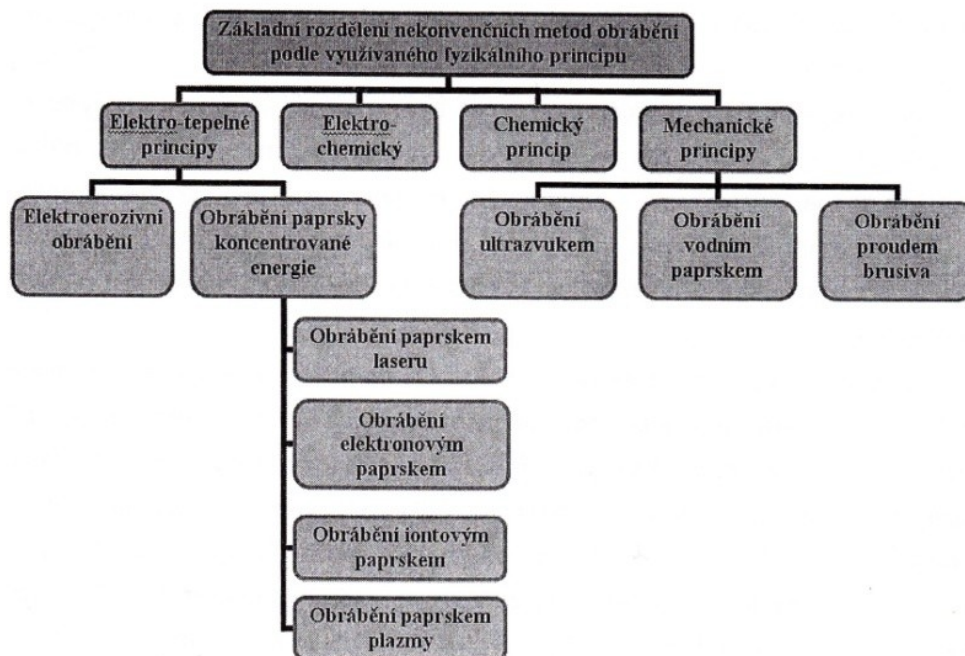
Mezi poměrně rozšířené nekonvenční způsoby obrábění patří i technologie vodního a abrazivního vodního paprsku. Jeden z prvních, kdo prokazatelně úspěšně využil vysokého tlaku vody pro řezání, byl Dr. Norman Franz. Je považován za otce vodního paprsku. V padesátých letech minulého století experimentoval s řezáním dřeva pomocí vysokorychlostního vodního paprsku. Dr. Franz dokázal, že velmi tenký paprsek vody, dosahující obrovských rychlostí při výtoku z trysky, má dostatečný řezný výkon, který by mohl být využit i při řezání dalších materiálů [23].

Koncem sedmdesátých let minulého století se Dr. Mohamed Hashish zabýval možnostmi, jak zvýšit řezný výkon vysokorychlostního vodního paprsku tak, aby byl schopen řezat kovy a jiné tvrdé materiály. Zjistil, že přítomnost abrazivního materiálu v paprsku výrazně zvýší jeho účinnost. Na základě svých poznatků vytvořil v roce 1979 abrazivní vodní paprsek a je tedy považován za otce abrazivního vodního paprsku. Tato technologie byla v brzké době použita na řezání oceli, skla i betonu. Od roku 1983 se technologie začala komerčně využívat [23].

## 1 Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění (NMO) jsou založeny na jiných principech než klasické třískové obrábění. Materiály jsou obráběny nejčastěji chemickými, tepelnými případně mechanickými způsoby nebo jejich vzájemnou kombinací. Při NMO se netvoří klasické třísky, které vznikají při obrábění klasickým konvenčním způsobem [1].

K rozšíření oblasti aplikací pro nekonvenční metody obrábění přispívá vývoj obráběcích strojů, zavádění CNC řídicích systémů a umělé inteligence u obráběcích strojů. Řídicí systémy umožňují snadný a přesný pohyb nástroje nebo obrobku obvykle ve třech na sobě kolmých osách, systémy však umožňují také nezávislé řízení v šesti osách [4].



Obr. 1.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění [3].

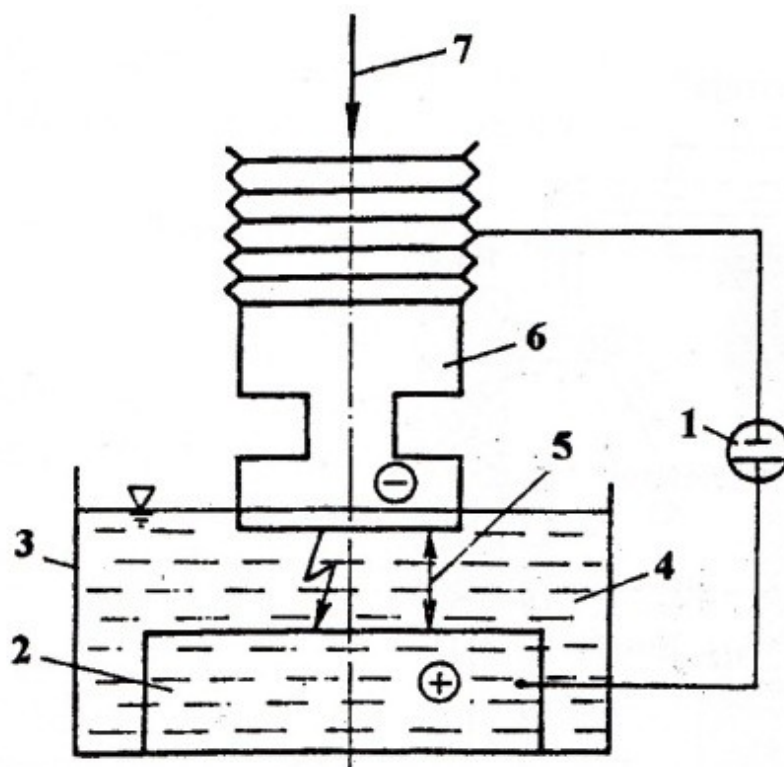
Podle způsobu úběru materiálu se NMO dělí na (viz obr. 1.1):

- Obrábění elektrickým výbojem – elektroerozivní obrábění elektrickou jiskrou a elektrickým obloukem,
- chemické obrábění – elektrochemické a chemické obrábění,
- obrábění paprskem koncentrované energie – laser, elektronovým paprskem, iontovým paprskem a plazma,
- obrábění mechanickými procesy – obrábění ultrazvukem, kapalinovým paprskem a proudem abraziva [1].

V další části bakalářské práce stručně popíšu některé v současnosti používané a rozšířené nekonvenční metody obrábění včetně výhod a nevýhod při jejich používání.

### 1.1 Elektroerozivní obrábění (Electro-Discharge Machining, EDM)

Podstatou elektroerozivní technologie obrábění (EDM) je přeměna elektrického výboje na tepelnou energii (obr. 1.1.1). Výboj vzniká mezi nástrojem (katoda) a obrobkem (anoda). Důsledkem je odtavení materiálu v místě obrábění. Podle výboje (oblouk nebo jiskra) lze EDM rozdělit na čtyři základní druhy – elektrojiskrové, elektroimpulsní, elektrokontaktní a anodomechanické. Pomocí EDM lze obrábět i velmi tvrdé materiály, jako např. karbidy, důležitá je však elektrická vodivost obráběného materiálu. Některé výhody a nevýhody technologie jsou uvedeny dále [5].



1 – generátor; 2 – obrobek; 3 – pracovní vana;  
4 – pracovní kapalina; 5 – pracovní mezera;  
6 – nástrojová elektroda; 7 – posuv nástrojové elektrody

Obr. 1.1.1 Princip elektroerozivního obrábění [2].

**Výhody:**

- Možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti,
- snadná automatizace procesu,
- velký rozsah pracovních parametrů,
- velmi přesná metoda,
- výroba tvarových součástí, snižuje se pracnost při jejich výrobě [3].

**Nevýhody:**

- Nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobené plochy,
- nutnost ponoření obrobku do dielektrika v průběhu obrábění,
- nutnost odvádět nebezpečné výpary vznikající při obrábění,
- nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů [3].

## 1.2 Elektrochemické obrábění (Electro-Chemical Machining, ECM)

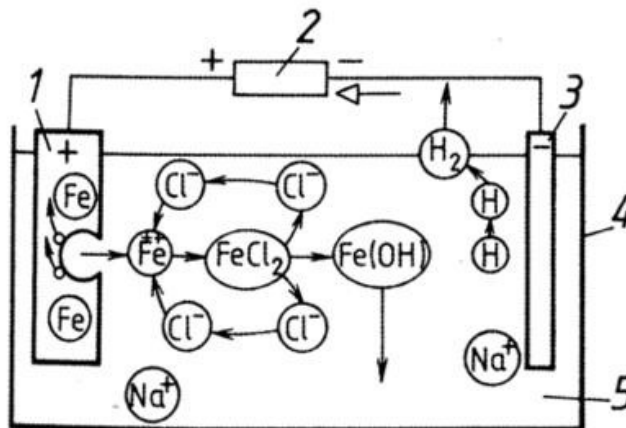
Principem elektrochemického obrábění (ECM) je řízené elektrolytické rozpouštění materiálu (obr. 1.2.1). Obrobek (anoda) je ponořen do elektrolytu společně s nástrojem (katodou). Na elektrody je přiveden velký stejnosměrný proud, který způsobí pohyb záporných aniontů elektrolytu k anodě a zároveň kladných kationtů obrobku ke katodě. Zde ionty odevzdávají svůj kladný nebo záporný náboj. Tyto ionty se zde změní na neutrální atomy nebo molekuly, které se buď rozpustí (chemicky reagují s materiálem) nebo vylučují na povrchu katody. Při obrábění dochází k úbytku hmoty obrobku (anody), aniž by podstatně ubývala hmota nástroje (katody). Obrobky mohou být tvarově složité, celý obráběcí proces je poměrně rychlý [6].

**Výhody:**

- Elektrody nepodléhají opotřebení,
- vysoká kvalita opracovaného povrchu,
- opracované díly jsou bez otřepů,
- nevzniká tepelně ovlivněná zóna [3].

**Nevýhody:**

- Metoda snižuje mez únavy obráběného materiálu,
- nutná likvidace elektrolytu a kalů po obrábění [3].



1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda), 4 – pracovní vana,  
5 – elektrolyt

Obr. 1.2.1 Elektrochemické obrábění- princip elektrolýzy [7].

### 1.3 Chemické obrábění (Chemical Machining, CM)

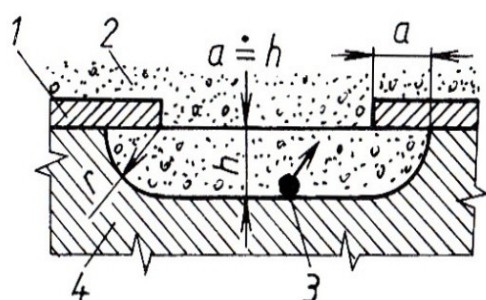
Principem technologie chemického obrábění (CM) je řízené odleptávání vrstev materiálu obrobku (leptání) prostřednictvím silného chemického činidla (leptadla). Princip CM je uveden na obr. 1.3.1. Mezi činidla patří kyseliny a louhy. Materiál se odstraní pomocí mikroskopického elektrochemického působení na materiál, jako je tomu u koroze nebo při chemickém rozpuštění kovů. Místa, která nemají být odleptána, jsou chráněna maskou (povlakem). Metoda je poměrně levná. Chemické obrábění lze podle principu odleptávání dále dělit na leptání, chemické rozměrové leptání, fotochemické obrábění, anizotropní a selektivní leptání a termické odstraňování ořepů [3], [8].

**Výhody:**

- Doba leptání nezávisí na celkové ploše obráběného povrchu,
- bezsilová metoda,
- nezpůsobuje vznik vnitřních pnutí,
- možnost obrábět složité tvary a jemné detaily [3].

**Nevýhody:**

- Těžko kontrolovatelné podřezávání,
- rozměry dílce jsou limitované rozměry nádrže, do které se ponoří,
- limitovaná tloušťka obrobku [3].



1 – maska, 2 – nástroj (chemická leptací látka),  
3 – odebrané (odleptané) částice materiálu  
obrobku, 4 – obrobek

Obr. 1.3.1 Princip chemického obrábění [1].

## 1.4 Obrábění laserem (Laser Beam Machining, LBM)

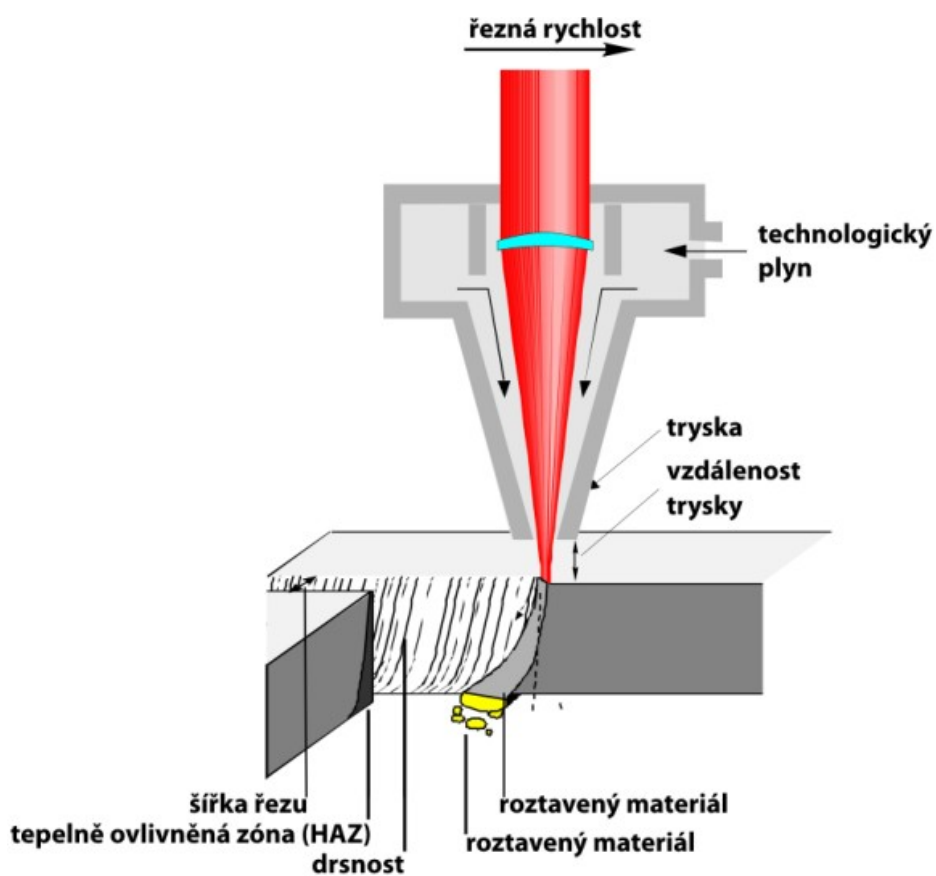
Principem technologie obrábění laserem (LBM) je přeměna úzkého svazku světelné energie na energii tepelnou, která slouží k odtavení materiálu v místě řezu (obr. 1.4.1). Zkratka LASER doslovně znamená *zesílení světla pomocí vybuzené emise záření* (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation). Technologie pracuje na principu indukované emise (vynuceného záření), která je vyvolána dodáním vnější energie do aktivního prostředí laseru. Tato energie (např. záření) donutí elektron obíhající jádro atomu přijmout určitou energii a vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Příjem další energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se zpět na nižší energetickou hladinu (svou původní oběžnou dráhu) a tím vyzářit přijatou energii do prostoru ve formě fotonu. Fotony pak reagují s dalšími elektrony a spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů se stejnou frekvencí a fází. Jelikož je aktivní prostředí umístěno v rezonátoru (zrcadla), fotony se odrážejí a opět procházejí aktivním prostředím. To dále podporuje vynucenou emisi a dochází k dalšímu zesílení toku fotonů. Výsledný světelný svazek pak opouští laser přes polopropustné zrcadlo. Během vývoje vzniklo několik typů laserů, často i na odlišných fyzikálních principech. Podle druhu aktivního prostředí je lze rozdělit na plazmatické, pevnolátkové, polovodičové, plynové a kapalinové, podle časového režimu provozu laseru pak na kontinuální a impulzní [11].

**Výhody:**

- Vysoká rychlost a přesnost obrábění,
- snadná příprava podkladů k obrábění (CAD/CAM) – tzv. In-Time Machining,
- konzistentní paprsek,
- tvarové obrábění, začátek řezu je možný i bez předchozího navrtání,
- možnost kusové výroby [3].

**Nevýhody:**

- Drahá zařízení,
- vznik plynů, výparů – nutný odtah z pracoviště,
- bezpečnostní rizika [3].



Obr. 1.4.1 Princip obrábění laserem [19].



## 1.5 Obrábění plazmou (Plasma Beam Machining, PBM)

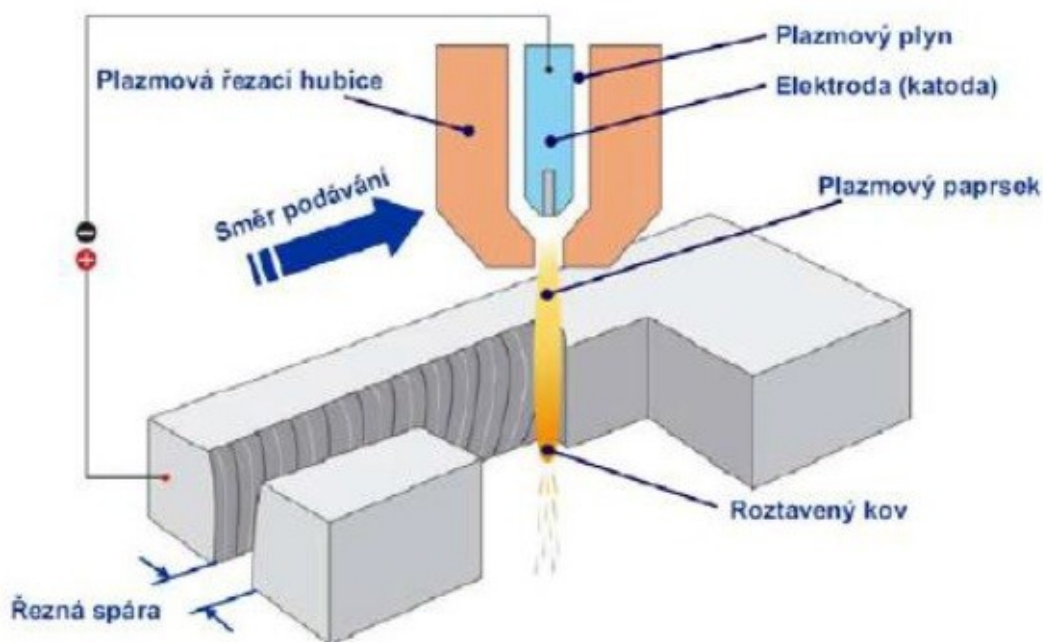
Podstata technologie obrábění plazmou (PBM) je odpařování a rozprašování materiálu pomocí paprsku plazmy (obr. 1.5.1). Plazmový paprsek je elektricky vodivý stav plynu, obsahující směs volných elektronů, pozitivně nabitých iontů a neutrálních atomů. Teplota plazmy dosahuje hodnot mezi 10 až 30 tis. °C. Používá se nejčastěji pro řezání ocelí a jiných kovových elektricky vodivých materiálů. Pro zvýšení přesnosti řezání a ovlivnění vlastností paprsku se někdy k ústí plazmové trysky přivádějí další pomocné plyny. Používané plyny lze rozdělit podle účelu na plazmové, fokusační a ochranné. Plazmové hořáky lze rozdělit podle typu oblouku na hořáky s transferovým obloukem (PAM) a s netransferovým obloukem, kdy je možné řezat i nevodivé materiály (PBM) [3], [9].

### Výhody:

- Levná zařízení.

### Nevýhody:

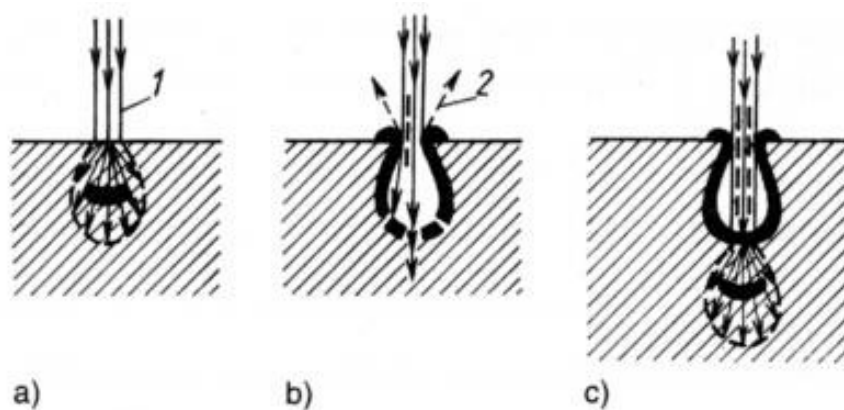
- Není možné ovlivnit reliéf obrábění,
- velká tepelně ovlivněná zóna,
- vznik velkého množství emisí [3].



Obr. 1.5.1 Princip obrábění plazmou [24].

## 1.6 Obrábění elektronovým paprskem (Electron Beam Machining, EBM)

Principem technologie obrábění elektronovým paprskem (EBM) je přeměna kinetické energie urychleného proudu elektronů na tepelnou energii. Elektronový paprsek vniká v materiálu pouze do určité hloubky, pak se pohyb elektronů zastaví. Tepelná energie, která vzniká při dopadu, způsobuje erupční odpařování materiálu (obr. 1.6.1). Páry, které vznikají při odpařování, jsou zionizovány a způsobí nové zaostření elektronového paprsku do pracovního místa [10].



a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování materiálu, c) opětový vnik elektronů do materiálu

1 – elektronový paprsek, 2 – páry odpařeného kovu

Obr. 1.6.1 Princip obrábění elektronovým paprskem [10].

### Výhody:

- Vysoká účinnost,
- použitelné prakticky na všechny druhy materiálů,
- rychlé a přesné vychylování paprsku elektronů [3].

### Nevýhody:

- Pracovní cyklus ve vysokém vakuu,
- vznik škodlivého RTG záření,
- vyskytují se problémy při opracování elektricky nevodivých materiálů (izolantů) a diamantu [3].

## 1.7 Obrábění iontovým paprskem (Ion Beam Machining, IBM)

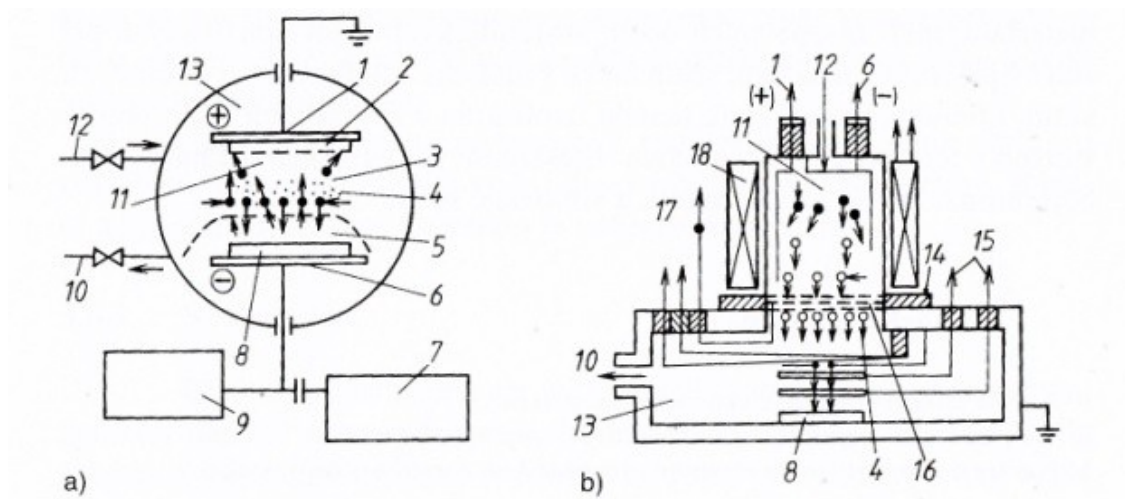
Technologie obrábění iontovým paprskem je založena na využití kinetické energie iontů. Obrobek je umístěn ve vakuu a je bombardován svazkem iontů (zdrojem iontů je většinou argon). Obrábění IBM probíhá přes krycí masku podobně jako u chemického obrábění. Schéma iontového obráběcího zařízení je na obr. 1.7.1. Obrábění iontovým paprskem lze rozčlenit na konkrétní technologické operace: např. implantace (Ion Beam Implantation Process), naprašování (Ion Beam Sputter Deposition), frézování (Ion Beam Milling) a strukturování (Ion Beam Texturing) [1].

### Výhody:

- Nevytváří se teplo, nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy,
- obrobený povrch má vysokou kvalitu,
- nezanechává žádné zbytkové napětí [3].

### Nevýhody:

- Nutnost aplikace ve vakuu,
- vysoká cena potřebného zařízení [3].



a) anizotropní leptání polovodičů, b) iontové leptání

1 – anoda, 2 – depozitní vrstva, 3 – elektrony, 4 – ionty, 5 – krycí maska, 6 – katoda, 7 – oscilátor, 8 – obrobek, 9 – voltmetr, 10 – vývěva, 11 – plazma, 12 – přívod argonu, 13 – vakuum, 14 – izolátor, 15 – snímač iontů, 16 – elektroda, 17 – potlačení elektronů, 18 – indukční cívky

Obr. 1.7.1 Schéma iontového obráběcího zařízení [1].

## 1.8 Obrábění ultrazvukem (Ultrasonic Machining, USM)

Technologie obrábění ultrazvukem (USM) je založena na obrušování obrobku účinkem abrazivního jemného brusiva, které je rozkmitáno vysokou frekvencí nástroje (20-30 kHz) a odstraňuje malé částice obrobku. Brusivo je rozptýleno v suspenzi (kapalině) a přivedeno mezi obrobek a nástroj. Tímto způsobem lze obrobit materiály velmi přesně až do zrcadlového lesku [12].

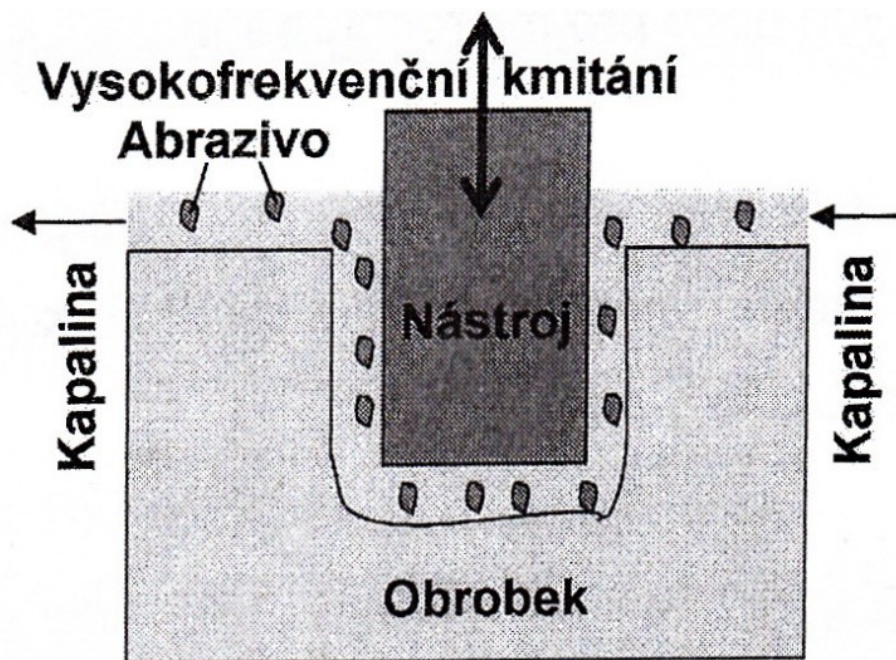
Jako samostatnou část USM lze označit technologii rotačního ultrazvukového obrábění (RUM). Na rozdíl od USM se RUM liší v pohybu diamantového nástroje při vzájemném pohybu s obrobkem, který koná axiální vysokofrekvenční a axiální rotační pohyb. Podstatou roli při tomto obrábění hraje kavitační opotřebení obrobku [3].

### Výhody:

- Žádné tepelné ani chemické ovlivnění obrobku,
- lze obrábět tvrdé a křehké materiály i elektricky nevodivé,
- vysoká kvalita obrobené plochy [12], [13].

### Nevýhody:

- Nelze obrábět plastické materiály [3].



Obr. 1.8.1 Princip technologie obrábění ultrazvukem [3].

## 1.9 Obrábění proudem vzduchu s abrazivem (Abrasive Jet Machining, AJM)

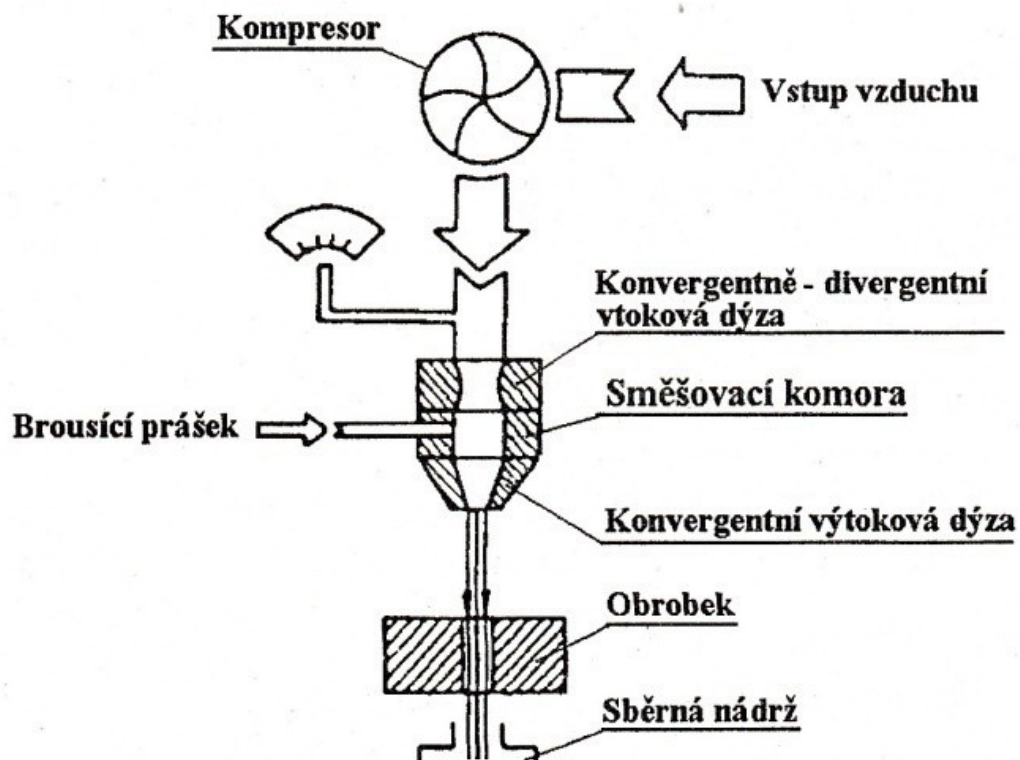
Technologie obrábění proudem abraziva (AJM) je založena na přeměně kinetické energie abraziva při dopadu na obrobek (obr. 1.9.1). Proud vzduchu s brusnými částicemi (abrazivem) má vysokou rychlost a odebírá materiál mechanickým nárazem. Mezi AJM lze zařadit i technologii opracování proudem vzduchu (AFM). Mezi hlavní technologické parametry tohoto typu obrábění patří tlak vzduchu, velikost částic, úhel dopadu proudu vzduchu na materiál, vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem, velikost (rychlost) posuvu trysky nad materiálem [3], [20].

### Výhody:

- Lze obrábět tvrdé materiály,
- nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu,
- levné médium [3], [20].

### Nevýhody

- Rozptýl paprsku,
- nízká rychlost obrábění [3].



Obr. 1.9.1 Princip obrábění proudem vzduchu s abrazivem [20].

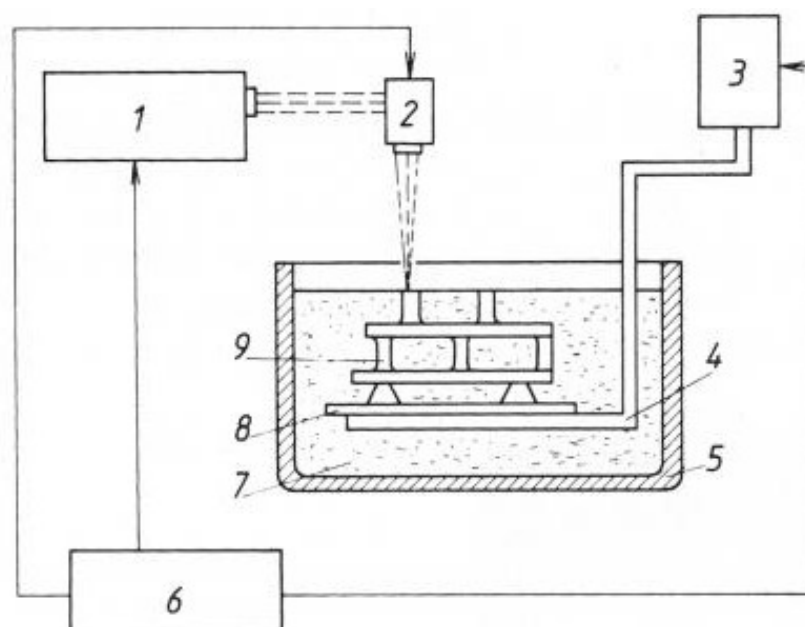


## 1.10 Stereolitografie

Tato metoda spadá pod skupinu technologií označovaných jako Rapid Prototyping. V češtině se vžil název 3D tisk. Principem stereolitografie je výroba 3D geometrického modelu např. strojní součásti, původně vytvořeného v CAD programu nebo odměřeného prostorovým skenerem. Počítačový model je převeden do příslušného formátu (nejčastěji STL) a data jsou pak načtena do softwaru pro Rapid Prototyping. Počítačový model je následně pomyslně rozřezán příčnými řezy s definovaným nastavením vzdáleností jednotlivých vrstev. Dále se navrhne podpůrná konstrukce pro vytvoření modelu a oddělení modelu od nosné desky (viz obr. 1.10.1) [28].

Při vlastním 3D tisku je materiál po vrstvách přidáván na součást. Součást je pro výrobu rozdělena na velké množství vrstev, jejichž tloušťka je v řádech setin až desetin milimetru. Takto lze vyrobit značně složité geometrické předměty i s vnitřními uzavřenými prostory [28].

Použití metod 3D tisku slouží nejen k vytvoření prostorových modelů součástí, ale také ke kontrole designu při vývoji obrobku, při výrobě forem a nástrojů, k ověření funkčnosti a k optimalizaci výrobků [28].



1 – laser, 2 – pracovní hlava laseru, 3 – systém pro posuv nosné desky, 4 – nosná deska,  
5 – pracovní vana, 6 – CNC řídicí systém, 7 – fotopolymer, 8 – podložka, 9 – vyráběná  
součást

Obr. 1.10.1 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie [28].

## **2 Obrábění vodním a abrazivním vodním paprskem (Water Jet Machining, WJM; Abrasive Water Jet Machining, AWJM)**

Jelikož při svých experimentech využívám technologii abrazivního vodního paprsku, věnuji této problematice samostatnou kapitolu, i když svým zaměřením by měla být včleněna do kapitoly 1 – **Nekonvenční technologie obrábění**.

Podstatou technologie je porušení materiálu po dopadu vodního proudu malého průměru pohybujícího se vysokou rychlostí (tzv. vodní paprsek, WJ) nebo vodního proudu s abrazivními částicemi (tzv. abrazivní vodní paprsek, AWJ).

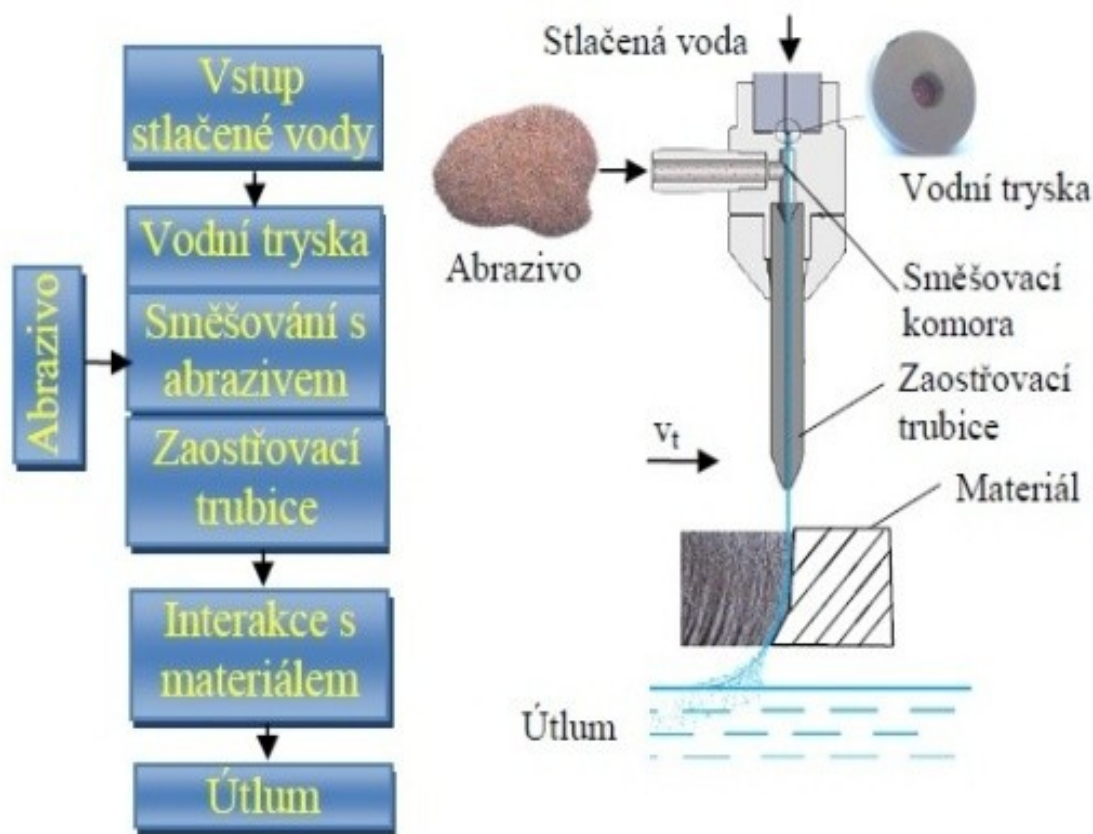
Vodní paprsek vzniká po průchodu vody o vysokém tlaku (až 600 MPa) úzkým otvorem (vodní tryskou). Tím dojde k přeměně tlakové energie vody na kinetickou energii paprsku. Vodní paprsek je vhodný k řezání měkčích materiálů (např. guma, papír, dřevo, plasty, potraviny, tenké plechy), k čištění a odstraňování povrchových vrstev. Pokud se za vodní trysku přidá tzv. směšovací komora, kde dojde ke smísení vodního paprsku s abrazivními částicemi, vznikne abrazivní vodní paprsek (obr. 2.1), který je schopen obrábět téměř jakýkoliv materiál. Určitou variantu abrazivního vodního paprsku představuje abrazivní suspenzní paprsek (ASJ), kdy jsou abrazivní částice míchány s vodou ještě před jejím natlakováním [1], [3], [18].

Obrábění vodním a abrazivním vodním paprskem tvoří velkou část z mnoha dalších aplikací vysokorychlostního kapalinového paprsku. Tato technologie má široký záběr uplatnění, protože vodní paprsek pracuje s různými objemovými průtoky, různými tlaky vody a pro každou aplikaci existují speciální trysky [18].

### **Výhody:**

- Obrobené (řezné) hrany nevykazují tepelnou ani mechanickou deformaci,
- dobrá energetická účinnost (až 80 %),
- proces je bezprašný, nevznikají žádné plyny nebo páry,
- malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu,
- možnost řezání pod hladinou vody,
- vysoká flexibilita i při složité geometrii výřezu,

- nedochází k poškození případných povrchových úprav materiálu,
- v obrobené ploše nezůstávají zbytková napětí a mikrotrhliny,
- možnost řezání vlnitých materiálů,
- přesné čištění a leštění povrchu těžkoobrobitelných materiálů,
- technologii lze snadno začlenit do automatizovaného systému výroby,
- možnost CNC řízení,
- při vhodně zvolených parametrech paprsku velmi kvalitní řez bez nutnosti dalšího opracování [3], [25].



Obr. 2.1 Schéma formování řezného paprsku v řezné hlavě [18].

#### Nevýhody:

- Vysoká pořizovací cena zařízení,
- řezaný materiál musí snášet přímý kontakt s vodou,
- nelze řezat kalené sklo, hrnčířskou hlinu v nezpracovaném stavu,
- zaoblení vnitřních rohů je dáno průměrem paprsku [3].

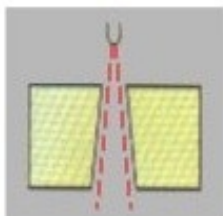


Podle způsobu generování lze paprsky dále členit na paprsky kontinuální (většina v současnosti používaných paprsků na řezání a čištění), paprsky pulzující (doposud ne příliš rozšířená, ale velmi slibná varianta vhodná zejména k úpravě a přípravě povrchů a k čištění, je několikanásobně účinnější než kontinuální paprsky) a paprsky kavitační (kavitační paprsek je kontinuální paprsek s obsahem kavitačních bublinek, po dopadu paprsku dochází k lokálnímu porušení materiálu destrukční kavitační silou) [3].

## 2.1 Vznik úkosu:

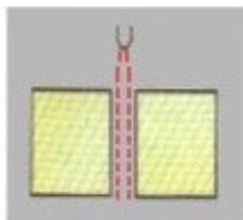
Při obrábění (řezání) WJM a AWJM vzniká ve většině případů určitý úkos, který má obvykle kolem  $1 - 1,5^\circ$ . Na vznik a rozsah úkosů má velký vliv tvar řezu, množství abraziva, typ řezaného materiálu apod. [21].

### Mohou nastat tyto případy:



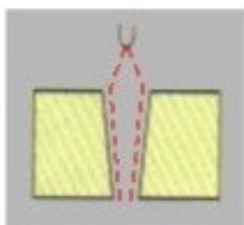
Tento případ vzniká při velmi pomalém řezu nebo řezu v měkkém materiálu. Paprsek stihne vytvořit svoji přirozenou kuželovitou stopu [21].

Obr. 2.1.1 Rozšiřující se řezná spára [21].



Toto je optimální rovnováha mezi rychlostí řezu, tloušťkou a odolností materiálu. Paprsek je udržen po celou dobu obrábění ve válcovém tvaru. Zde žádný úkos nevzniká [21].

Obr. 2.1.2 Přímá řezná spára [21].

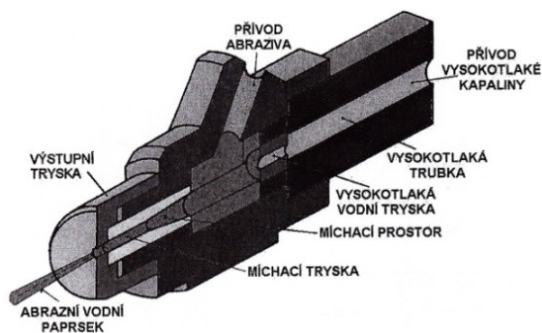


Při tomto případě je řez velmi rychlý anebo jde o řez v tvrdém materiálu. Paprsek zde nestihne vytvořit svoji kuželovitou stopu. Řez se směrem dolů uzavírá [21].

Obr. 2.1.3 Zuzující se řezná spára [21].

## 2.2 Aplikace WJM a AWJM

Vysokorychlostní vodní paprsek i abrazivní vodní paprsek se používají při různých technologických operacích. Velmi častá aplikace je řezání a vrtání různých materiálů. Méně časté je soustružení, frézování, gravírování a leštění. Velkou oblast zaujímá čištění (otryskávání) a odstraňování povlaků a nánosů. Některé aplikace vyžadují tvorbu drážek a úkosů případně i odstraňování ořepů [3].



Obr. 2.2.1 Řezací hlavice [3].

Jako abrazivo pro vytváření abrazivního vodního paprsku se používá nejčastěji granátový písek vhodné zrnitosti. Méně často se používá olivín ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), případně korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Pro řezání např. zmražených potravin je možno použít i krystalky ledu nebo soli či cukru. Velikosti abrazivních zrn podle mezinárodní klasifikace MESH udává tab. 2.2.1. Abrazivo je přisáváno podtlakem do směšovací komory v řezné hlavici (obr. 2.2.1) [3], [17].

Tab. 2.2.1 Velikost abrazivních částic [17].

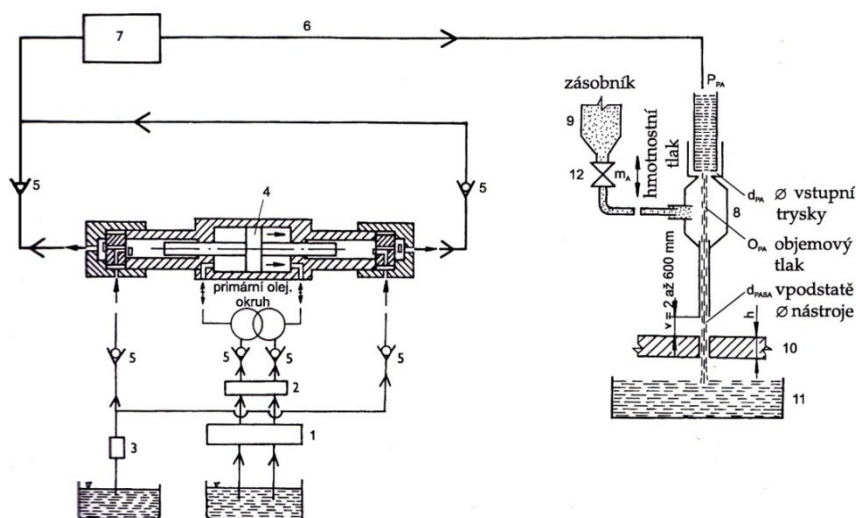
MESH	Velikost otvoru síta [mm]
16	1,000
36	0,417
60	0,250
80	0,188
100	0,150
150	0,106
200	0,063

## 2.3 Popis zařízení nařezání vodním paprskem

Zařízení se skládá ze dvou okruhů. V primárním okruhu je vysokotlaké olejové čerpadlo (pozice č. 1), které dodává pracovní tlak. Olej je tlačén přes uzavírací ventil (pozice č. 2), který umožňuje mžikové přerušování průtoku. Dále jde do zesilovače tlaku multiplikátoru (pozice č. 4), který dodává olej střídavě na obě strany pístu. Tlak oleje působí na plochu velkého pístu, který je spojen se dvěma pístnicemi o daleko menším průměru, na jejichž koncích se vytvoří mnohonásobně větší tlak. Toto zvětšení závisí na poměru velikosti průměru velkého pístu k průměru malé pístnice. Nízkotlaká voda je přiváděna do tlakových komor obou pístnic přes filtrační jednotku (pozice č. 3) [6].

V sekundárním okruhu jsou zpětné ventily (pozice č. 5). Dále je tento okruh tvořen vysokotlakým akumulátorem (pozice č. 7). Akumulátor má za úkol tlumit rázy ve vysokotlaké vodě, které vznikají postupným vpouštěním vysokotlaké vody z jedné a druhé tlakové komory. Z akumulátoru je vysokotlaká voda o konstantním tlaku vedena potrubím (pozice č. 6) do vodní trysky a vzniklý vodní paprsek pak vstupuje do směšovací komory (pozice č. 8), kde se mísí s abrazivem, a pokračuje do zaostřovací trubice (obr. 2.3.1). Z této trubice vytéká abrazivní vodní paprsek nadzvukovou rychlostí. Pod řeznou hlavici je umístěn stůl s řezaným materiálem (pozice 10). Součástí stolu je i vodní nádrž, která utlumí zbytkovou energii paprsku po řezání (pozice 11) [6].

Abrazivo je umístěno v zásobníku (pozice č. 9), které je přiváděno přes ventil s klapkou a mžikovým přepouštěním (pozice 12) do speciálně tvarované ořezuvzdorné směšovací komory (pozice č. 8) [6].



Obr. 2.3.1 Schéma řezacího stroje na vodní paprsek [6].

### 3 Porovnání jednotlivých nekonvenčních metod

Tab. 3.1 Srovnání vybraných parametrů při tvarovém řezání materiálů [3], [29], [30].

Metoda		Elektrojiskrové řezání	Řezání laserem	Plazmové řezání	Řezání elektronovým paprskem	Řezání abrazivním a vodním paprskem
Hodnotící faktor	Jednotky	EDM	LBM	PBM	EBM	WJM, AWJM
Max. tloušťka materiálu	[mm]	0,02 až 400	až 50 hospodárné okolo 7	i přes 100 korozi až 130 slitiny Al a Cu až 150	0,5 až 1 (kovy 2 až 3)	0,1 až 200 (dělicí řez)
Šířka řezu	[mm]	Ø drátu + 0,02 až 0,05	0,02 až 1	Až 7 nahoře 4,5 dole	0,01	0,8 až 1,5 0,3 tenké materiály
Šířka řezného nástroje (paprsku)	[mm]	0,03 až 0,35	0,02 – 0,2			0,1 až 1,5 WJM 0,8 až 2,5 AWJM
Rychlost posuvu	[mm · min <sup>-1</sup> ]	úběr materiálu 8 až 300 mm <sup>2</sup> · min <sup>-1</sup>	až 8000	50 až 6000	až 1200	15 až 1500
Přesnost rozměrů	[mm]	0,013 (poloha drátu ±1° ± 1 μm ±3° ± 3 μm)	25 až 75 μm	750 až 2500 μm	25 až 75 μm	± 0,1 až ± 1
Parametr drsnosti povrchu Ra	[μm]	0,08 až 0,3 běžně 0,7 až 1,3	3,6 až 12	0,8 až 3,6	3,6 až 6,3	2,5 až 12
Tepelné ovlivnění materiálu	[mm]	0,4 až 1	0,05 až 0,2	0,25 až 1,25 (při chlazení trhliny až do 1,6)	0,25	Není

## 4 Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce se zabývá přípravou zkušebních vzorků, měřením a hodnocením kvality topografie povrchů řezných ploch pro daný typ materiálu a porovnáváním jednotlivých parametrů pro dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem.

### 4.1 Zkušební materiál

Vzorky pro hodnocení řezné plochy po dělení AWJM byly vyrobeny z nerezové oceli 1.4301. Tento materiál je nemagnetický a nekalitelný. Má odolnost proti korozi v běžném prostředí. V oblasti tepelného ovlivnění je náchylný na mezikrystalovou korozi a má sklon ke zpevňování za studena při tažení. Tato ocel se používá pro obecné použití (gastronomická zařízení, vnější konstrukce, externí architektura), kromě svařovaných konstrukcí s provařením nad 5 mm průvaru [15].

#### Technické informace k materiálu:

Tab. 4.1 Chemické složení [14].

Prvek	[%] C <sub>max</sub>	[%] Mn <sub>max</sub>	[%] P <sub>max</sub>	[%] S <sub>max</sub>	[%] Si <sub>max</sub>	[%] Cr <sub>max</sub>	[%] Ni <sub>max</sub>
Hodnota	0,07	2	0,045	0,03	1	18/20	8/10

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti [14].

Vlastnost	Pevnost v tahu R <sub>p</sub> [N·mm <sup>-2</sup> ]	Struktura	Pevnost v tahu R <sub>p</sub> [N·mm <sup>-2</sup> ]	Tvrdost max. [%]	Tvrdost max. (HRB)
Hodnota	540/680	Austenitická	195	45	88

## 4.2 Hodnocení topografie povrchu

Žádný povrch není dokonale rovný. Proto se skutečný povrch součásti liší od jejího předepsaného geometrického tvaru (tvar je určen výkresem nebo jinou technickou dokumentací). Tyto odlišnosti vznikají na povrchu a jsou tvořeny výstupky a prohlubněmi po celé ploše. Při jakémkoliv obrábění není struktura povrchu ve všech směrech stejná [16].

### Ve struktuře povrchu lze rozlišit:

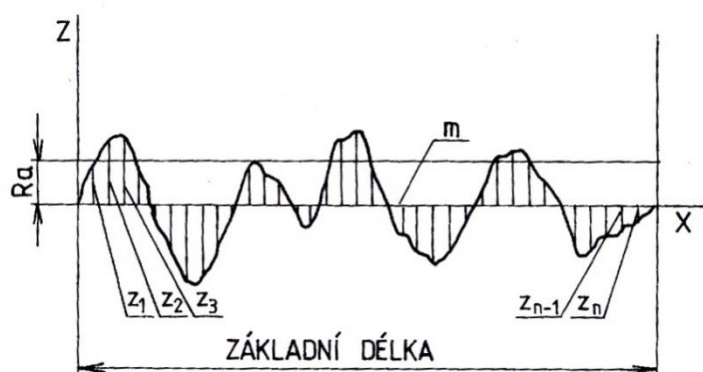
- Příčnou drsnost (drsnost v příčném profilu kolmém na řezný pohyb),
- podélnou drsnost (drsnost v podélném profilu ve směru řezného pohybu) [16].

V technické praxi se k hodnocení struktury povrchu používá norma ČSN EN ISO 4287. Tato norma zavádí mimo jiné tyto termíny struktur povrchu:

- Nejvyšší výška profilu  $R_z$  – (maximum height of profile) součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [16], [26].
- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $R_a$  – (arithmetical mean deviation of the assessed profile) aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

kde  $Z$  je hodnota absolutní úchylky  $i$ -tého bodu profilu od střední čáry  $m$  profilu – viz obr. 4.2.1 [16], [26].



Obr. 4.2.1 Průměrná aritmetická úchylka  $R_a$  [16].

**Hodnocení kvality řezné plochy pro AWJM:**

Pro hodnocení kvality plochy řezné abrazivním vodním paprskem se používají tzv. stupně kvality, které jsou označovány Q1 až Q5, přičemž Q5 označuje nejlepší a Q1 nejhorší možnou plochu. Obrázek 4.2.2 ukazuje stupně kvality po obrábění AWJM. Tabulka 4.2.1 blíže popisuje jednotlivé stupně kvality.



Obr. 4.2.2 Stupně kvality řezu [21].

Tab. 4.2.1 Orientační popis stupňů kvality řezu [27].

Stupeň	Druh řezu	Drsnost Ra	Tvarová přesnost [mm]	Úkos
Q 5	Nejlepší	3,2	$\pm 0,1$	Většinou mírný
Q 4	Kvalitní	3,2 – 6,3	$\pm 0,1$	Většinou minimální
Q 3	Střední	4,0 – 12,5	$\pm 0,15$	Dle typu materiálu
Q 2	Hrubý	4,0 – 25	$\pm 0,2$	Dle typu materiálu
Q 1	Dělicí	6,3 – 40	$\pm 0,2$	Výrazný úkos

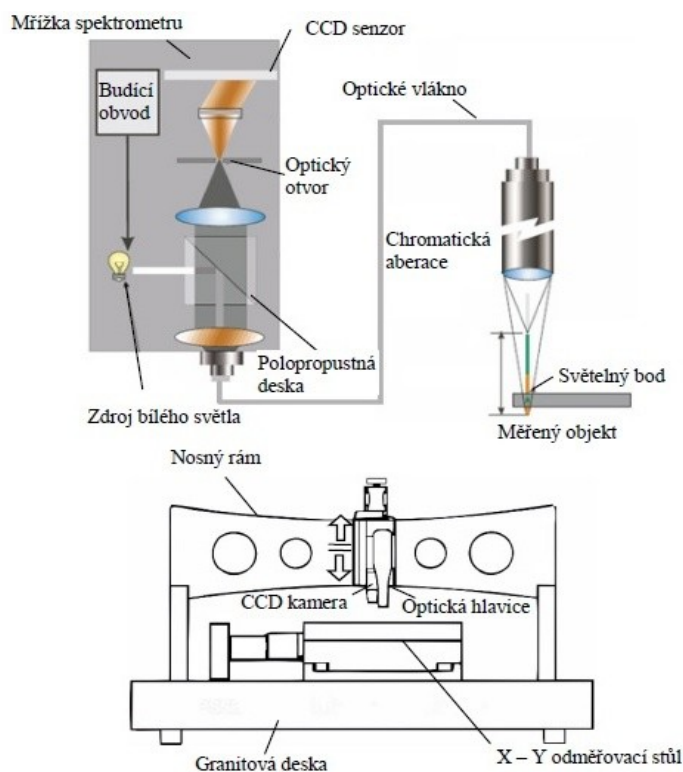
### 4.3 Měření topografie povrchu

Měření struktury povrchu lze provádět mnoha způsoby. Od dříve používaných kontaktních metod se stále více přechází k metodám optickým – bezkontaktním. Povrchy zkušebních vzorků zhotovených při AWJM byly změřeny na profilometru MicroProf FRT optickou metodou. Parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v příloze 2.

#### **Princip profilometru MicroProf FRT:**

Profilometr je založen na optické metodě snímání zkoumaného povrchu. Tato metoda využívá bezkontaktního principu měření, takže v procesu měření nedochází k mechanickému kontaktu mezi měřicím přístrojem a povrchem materiálu [18].

Ze světelného zdroje (obr. 4.3.1) je bílé světlo přiváděno přes optický hranol s polopropustnou deskou ke spojné čočce. Tato čočka rozloží bílé světlo na jednotlivé barevné složky do různých výšek nad vztažnou rovinou. Po dopadu na zkoumaný povrch je světlo odraženo zpět do spojitě čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Hodnoty vystupující ze spektrometru jsou pomocí kalibrační tabulky převedeny na hodnoty vzdálenosti mezi povrchem vzorku a senzorem. Tímto způsobem jsou získány informace o výškové nerovnosti povrchu [18].



Obr. 4.3.1 Schéma optického profilometru [18].



#### 4.4 Experimentální postup

Pro experimentální ověřování vlivu AWJM na topologii řezného povrchu byly na komerčním řezacím stole firmy PTV s.r.o. provedeny průchozí řezy v materiálu 1.4301 při různých parametrech paprsku. Některé parametry byly udržovány neměnné (tlak vody, průměr vodní trysky, průměr a délka zaostřovací trubice, vzdálenost hlavice od materiálu, úhel dopadu paprsku na materiál a typ abraziva). Měnily se rychlost řezání (20, 40, 60 a 80 mm·min<sup>-1</sup>) a průtoky abraziva (200 a 400 g·min<sup>-1</sup>). Základní parametry stroje a vysokotlakého čerpadla jsou uvedeny v příloze 1.

Zkušební vzorky byly vyrobeny z nerez oceli 1.4301 (viz kapitola 4.1) a nařezány na rozměr 100 x 30 x 4 mm (délka x šířka x hloubka). Pro jednotlivé zkušební vzorky (viz obr. 5.1.1 až 5.8.1) jsou vstupní hodnoty experimentu pro řezání na komerčním řezacím stole uvedeny v příloze 3.

Následně byly řezné plochy vzorků zkoumány a vyhodnoceny na profilometru MicroProf FRT optickou metodou (viz kapitola 4.3). Parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v příloze 2. Pro hodnocení parametrů řezného povrchu byly analyzovány jednotlivé profily povrchu snímáné kolmo k ose řezacího paprsku. Vzdálenost mezi jednotlivými profily byla 1 mm, celkem bylo nasnímáno 30 profilů (linií) pro každý měřený povrch. Jako horní a dolní byly vybrány profily, které jsou vzdáleny od vstupní a výstupní hrany povrchu o 1 mm (druhý shora, předposlední zespodu), protože v místě hrany vzorku se mohou vyskytovat chybné hodnoty nerovností způsobené neočekávanými lomy a odrazy optického paprsku profilometru apod.

Pomocí software pro analýzu dat byly zjištěny parametry řezného povrchu (hodnoty drsností) pro každý profil. Mezi vyhodnocované parametry byly zařazeny *nejvyšší výška profilu Rz a průměrná aritmetická úchylka profilu Ra*. Hodnocena byla také kvalita povrchu po řezání (viz kapitola 4.2). Výsledné hodnoty parametrů pro jednotlivé profily jsou uvedeny v příloze 4, stupeň kvality každého povrchu je určen v kapitole 5.

Experimentální práce byly realizovány na pracovišti Oddělení desintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i., které disponuje zařízením na řezání vysokorychlostním vodním paprskem i příslušnou vyhodnocovací a laboratorní technikou. Fotografie z prováděného experimentu jsou uvedeny v příloze 5.

## 5 Výsledky experimentů

Na následujících stranách jsem uvedl výsledky experimentů ve formě obrázků a grafů pro každý vzorek (řeznou plochu). Jako první je vždy uvedena fotografie řezné plochy, potom graf vývoje drsností se vzrůstající vzdáleností od horní hrany (hrany vstupu paprsku do řezu). Následuje ukázka dvou profilů z horní (1) a dolní (2) části řezné plochy, včetně znázornění jejich umístění na ploše. Dole jsem pak uvedl zařazení řezné plochy do kvalitativního stupně.

V další části jsem porovnal drsnosti řezných ploch pro jednotlivé vzorky řezané různou rychlostí pro hmotnostní průtok abraziva 400 a 200 g·min<sup>-1</sup>. V závěru kapitoly jsem pak uvedl porovnání dvou řezných ploch o různé kvalitě, které byly získány jako 3D počítačové rekonstrukce reálných ploch z profilometru MicroProf FRT.

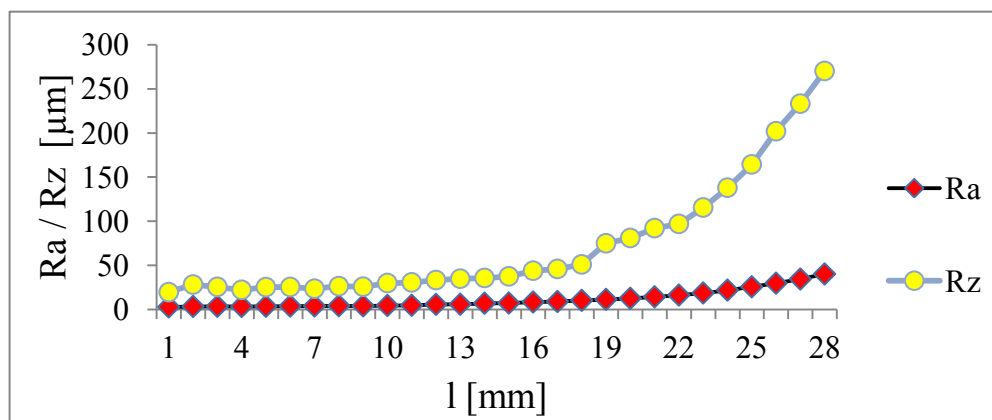
## 5.1 Zkušební vzorek č. 1

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 80 mm·min<sup>-1</sup>)



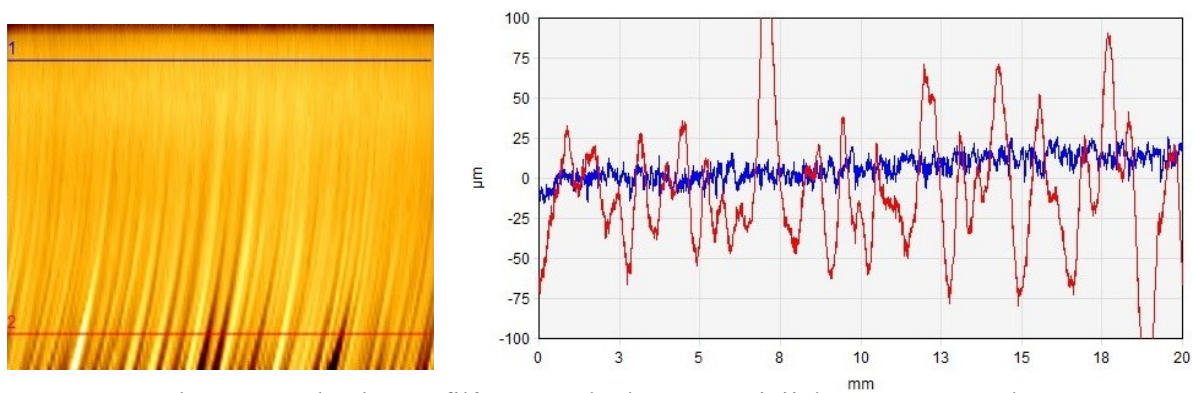
Obr. 5.1.1 Zkušební vzorek č. 1

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.1.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

### Ukázka profilů řezné plochy:

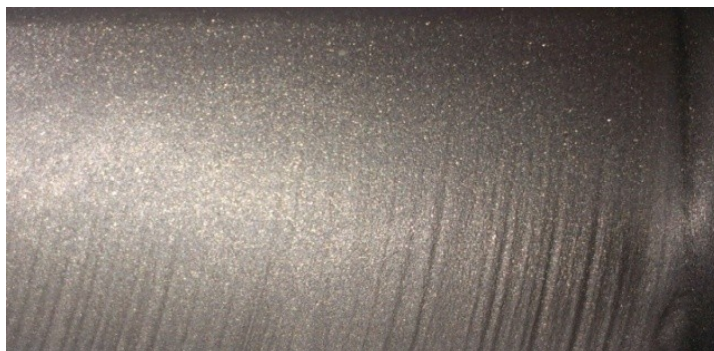


Obr. 5.1.2 Ukázka profilů řezné plochy včetně jejich umístění na ploše

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q2.

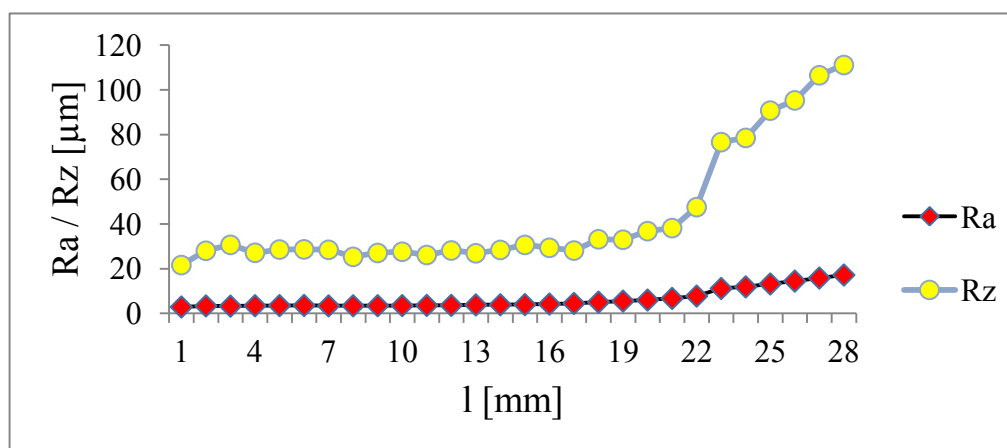
## 5.2 Zkušební vzorek č. 2

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 60 mm·min<sup>-1</sup>)



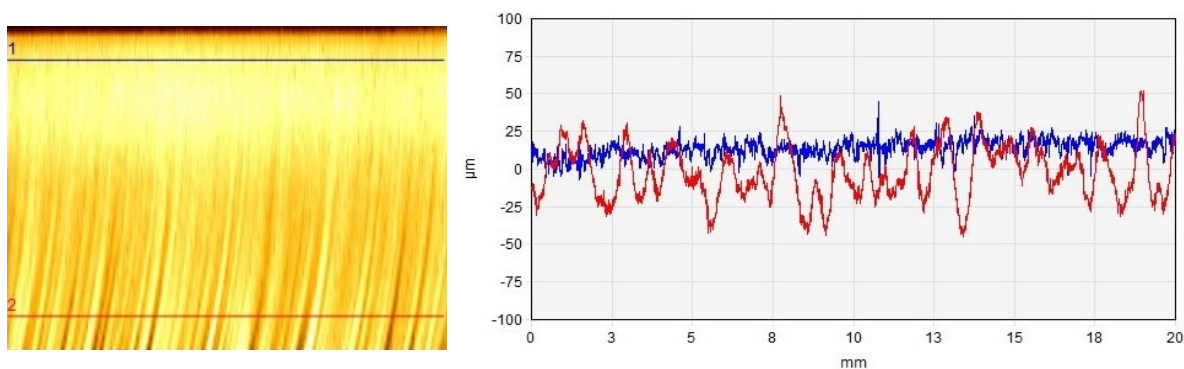
Obr. 5.2.1 Zkušební vzorek č. 2

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.2.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:

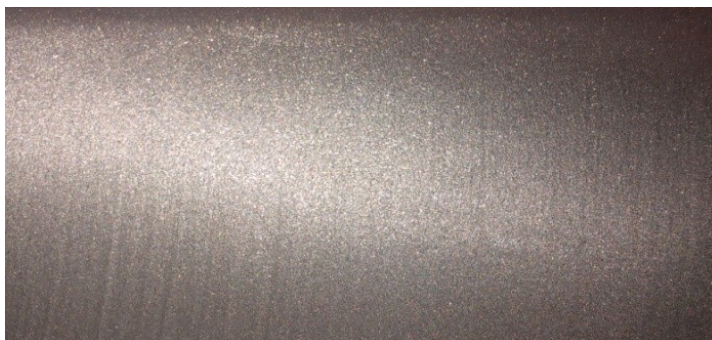


Obr. 5.2.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q3.

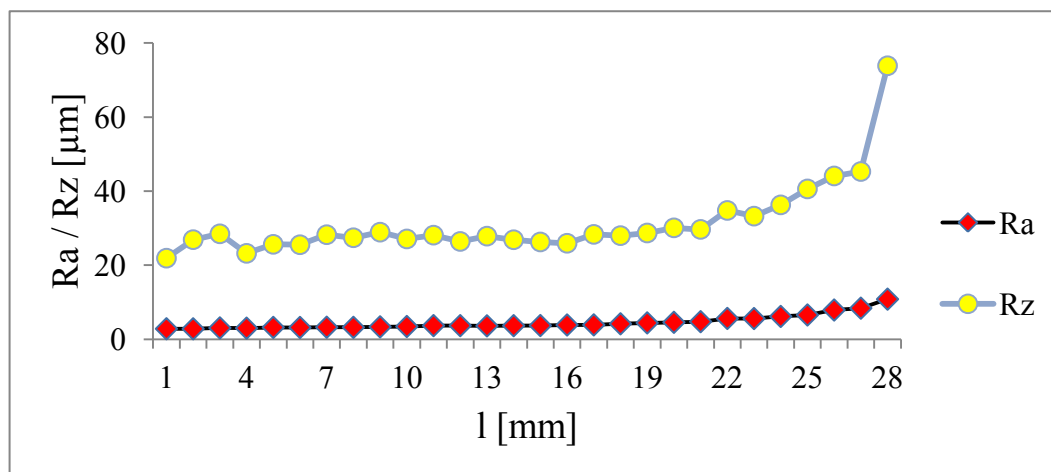
### 5.3 Zkušební vzorek č. 3

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva  $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , rychlost řezání  $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )



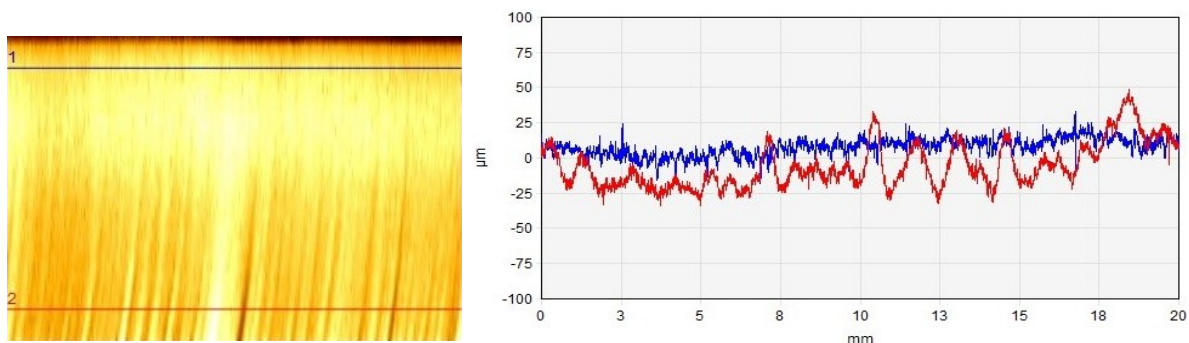
Obr. 5.3.1 Zkušební vzorek č. 3

#### Naměřené drsnosti:



Graf 5.3.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

#### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:

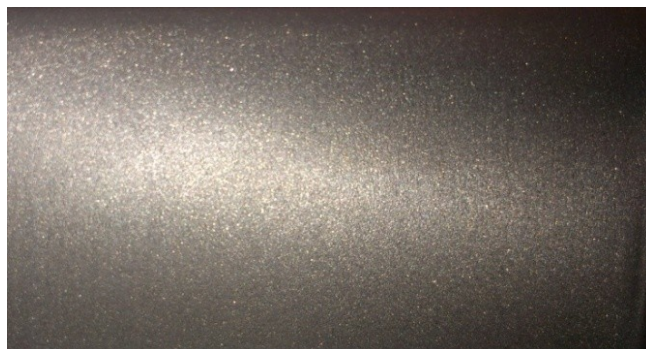


Obr. 5.3.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeneho povrchu do třídy Q4.

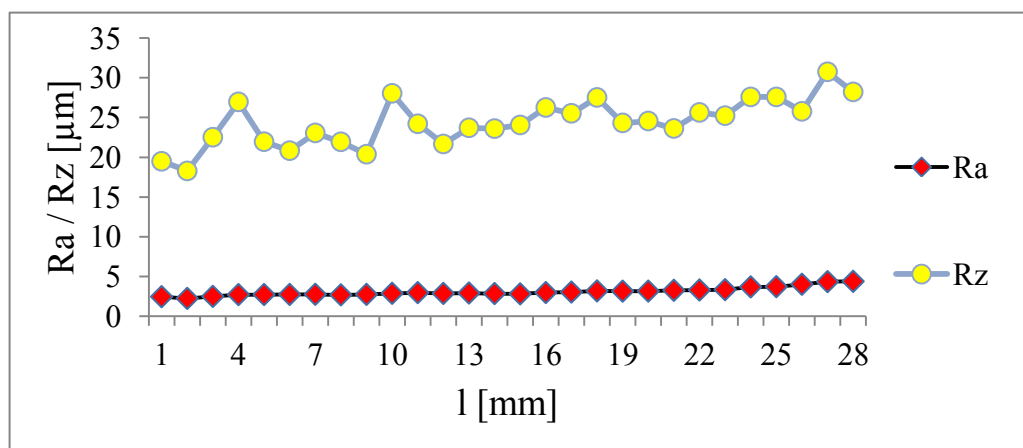
## 5.4 Zkušební vzorek č. 4

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 20 mm·min<sup>-1</sup>)



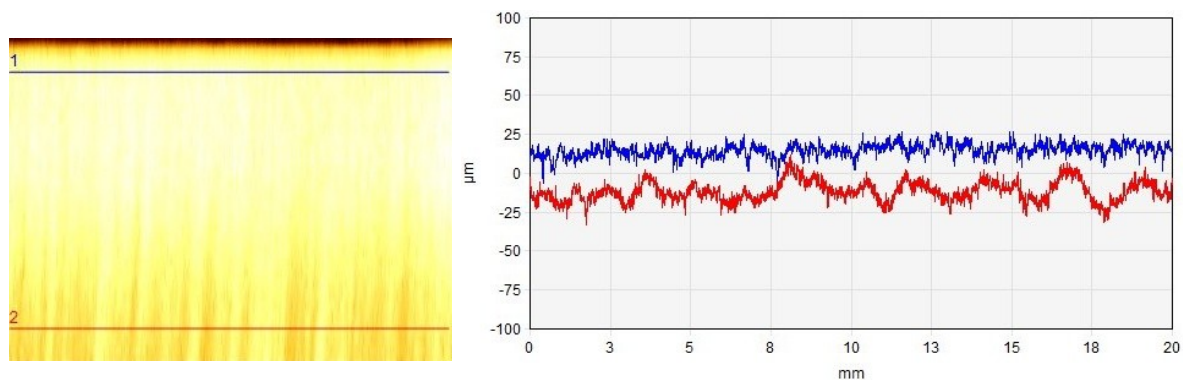
Obr. 5.4.1 Zkušební vzorek č. 4

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.4.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:



Obr. 5.4.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.



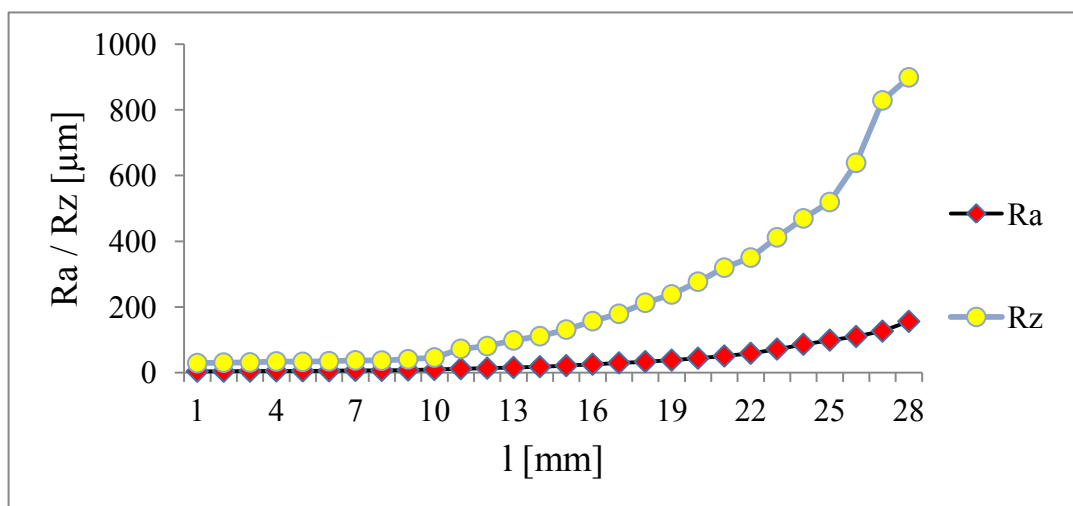
## 5.5 Zkušební vzorek č. 5

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 200 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 80 mm·min<sup>-1</sup>)



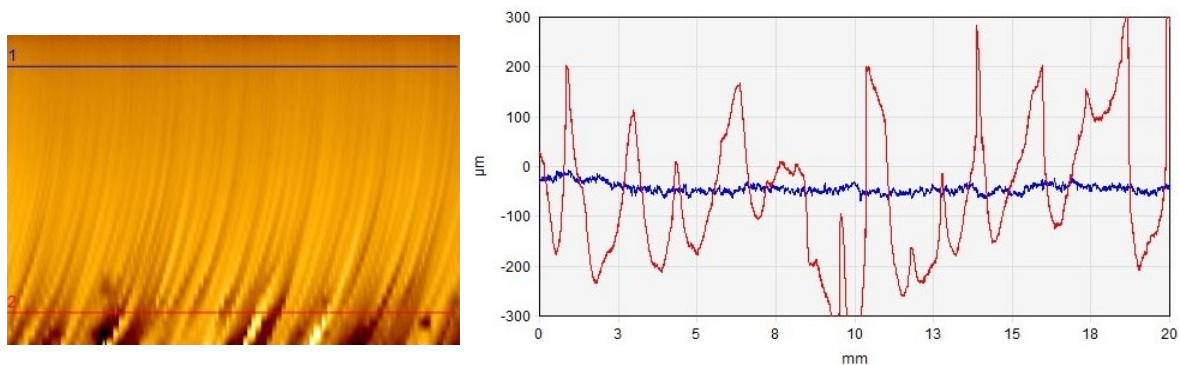
Obr. 5.5.1 Zkušební vzorek č. 5

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.5.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:

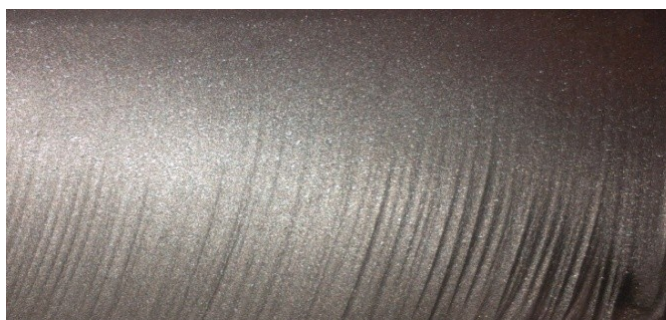


Obr. 5.5.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeneho povrchu do třídy Q1.

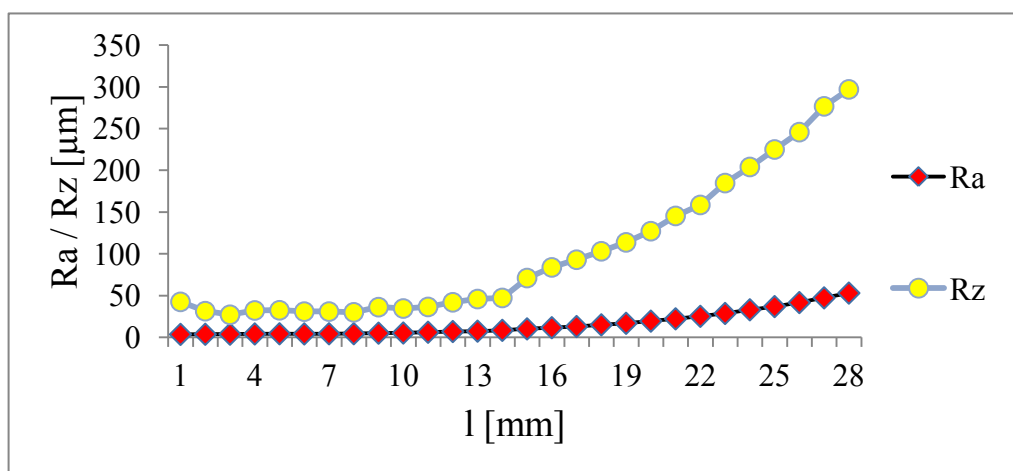
## 5.6 Zkušební vzorek č. 6

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 200 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 60 mm·min<sup>-1</sup>)



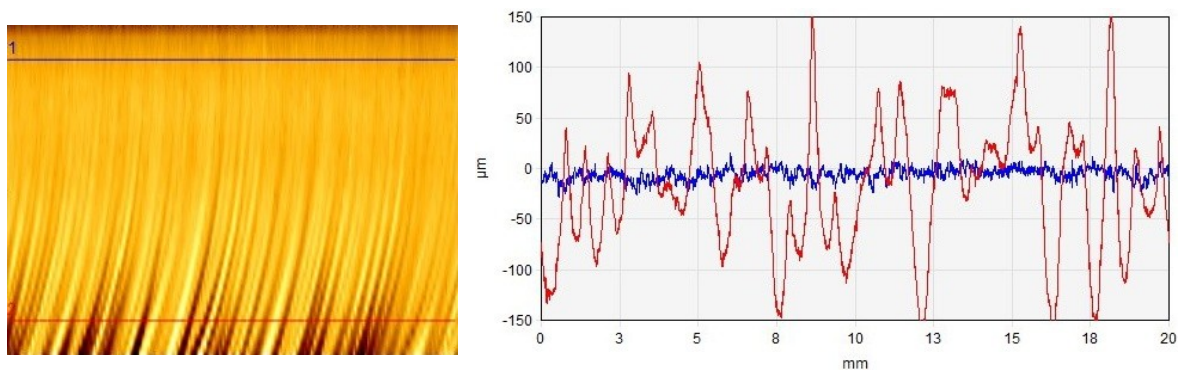
Obr. 5.6.1 Zkušební vzorek č. 6

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.6.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:



Obr. 5.6.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q2.



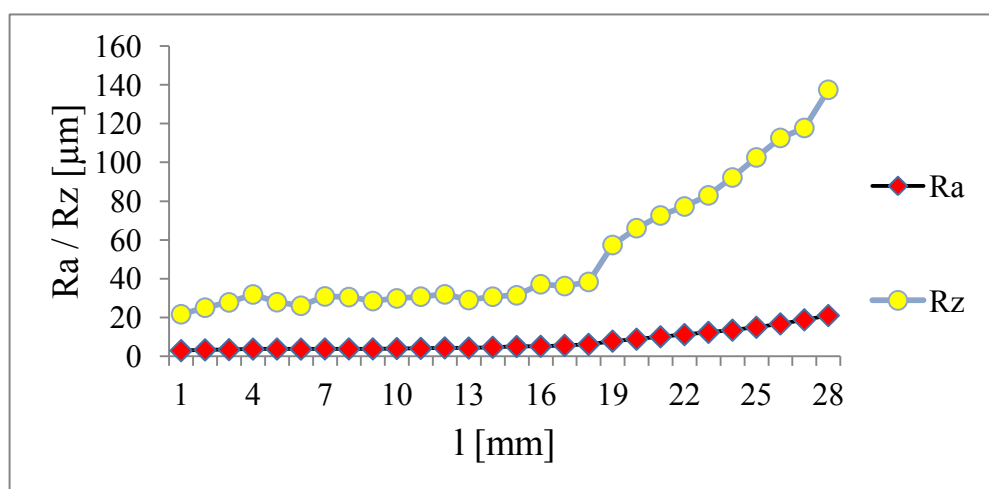
## 5.7 Zkušební vzorek č. 7

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 200 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 40 mm·min<sup>-1</sup>)



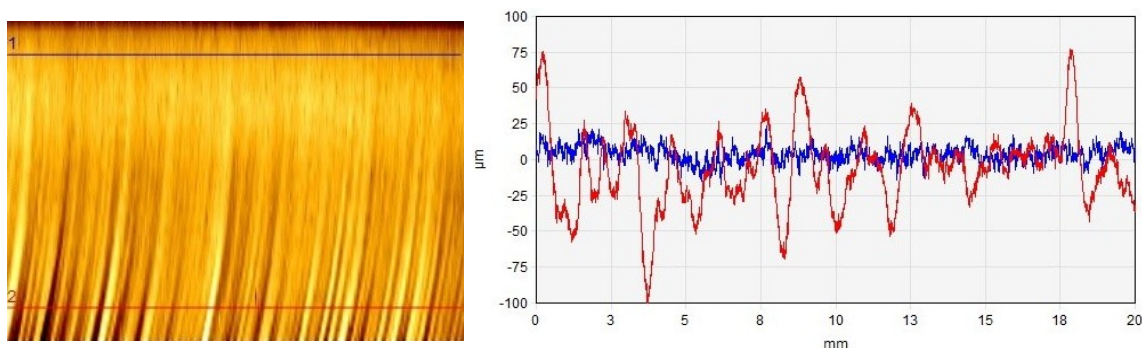
Obr. 5.7.1 Zkušební vzorek č. 7

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.7.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:

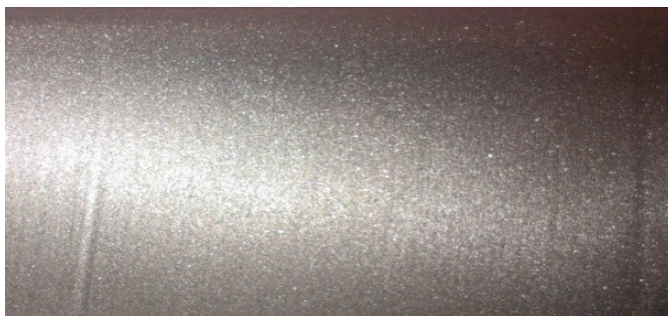


Obr. 5.7.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q3.

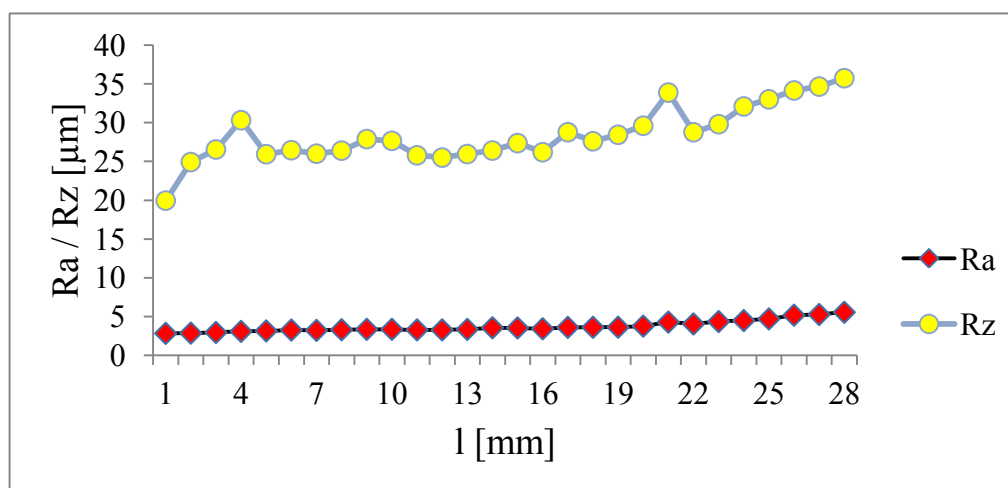
## 5.8 Zkušební vzorek č. 8

(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 200 g·min<sup>-1</sup>, rychlost řezání 20 mm·min<sup>-1</sup>)



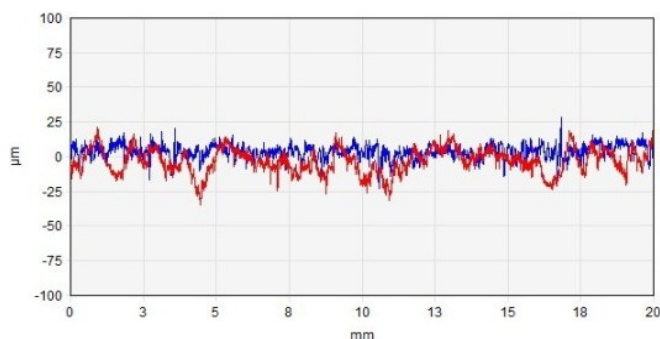
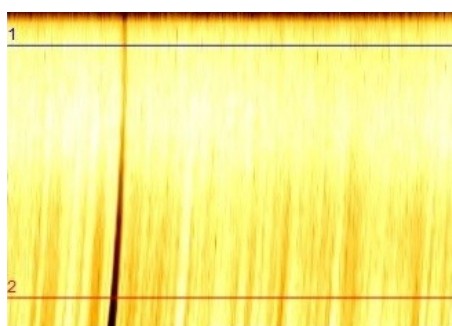
Obr. 5.8.1 Zkušební vzorek č. 8

### Naměřené drsnosti:



Graf 5.8.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

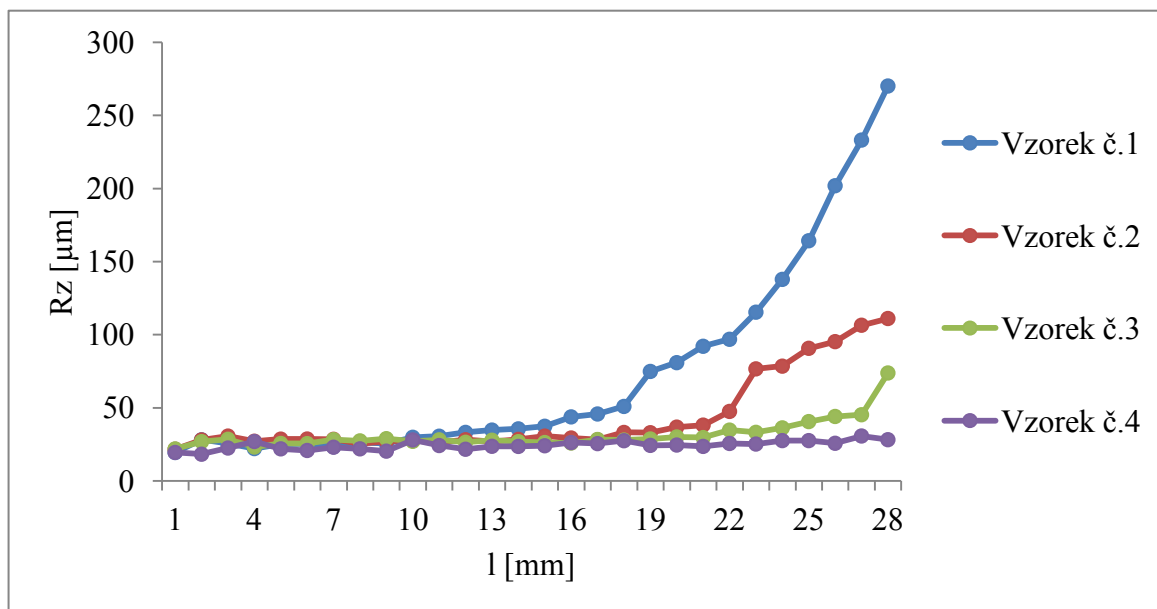
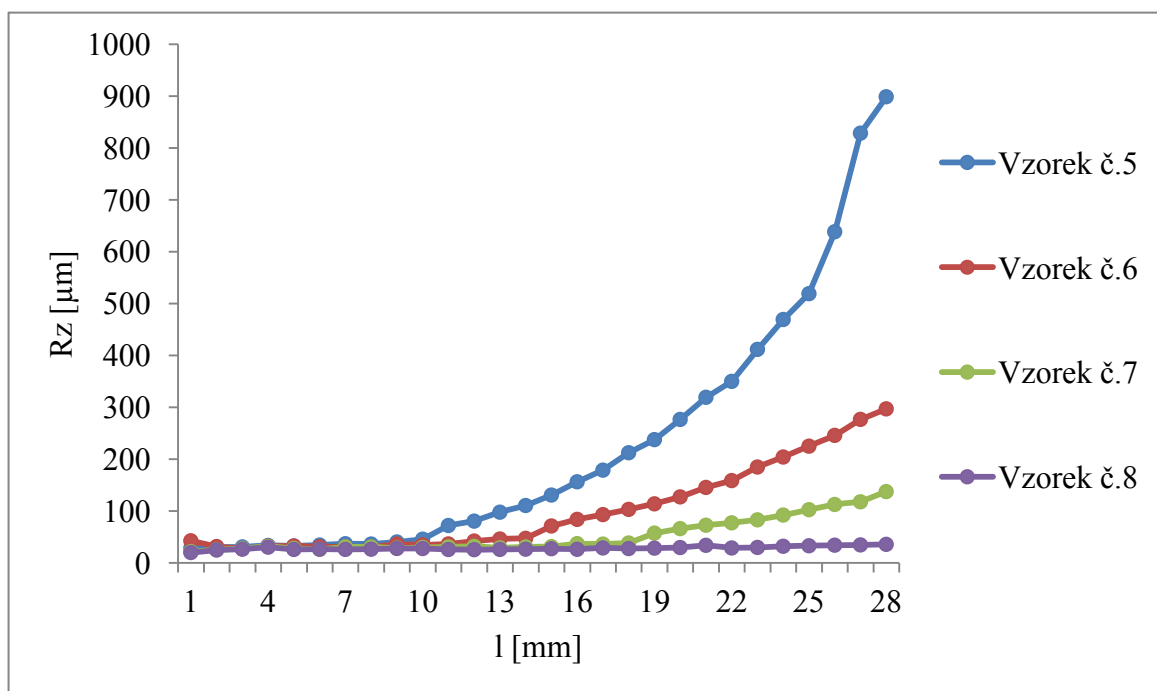
### Analýza složek nerovnosti profilu povrchů:



Obr. 5.8.2 Analýza složek nerovnosti profilu povrchů

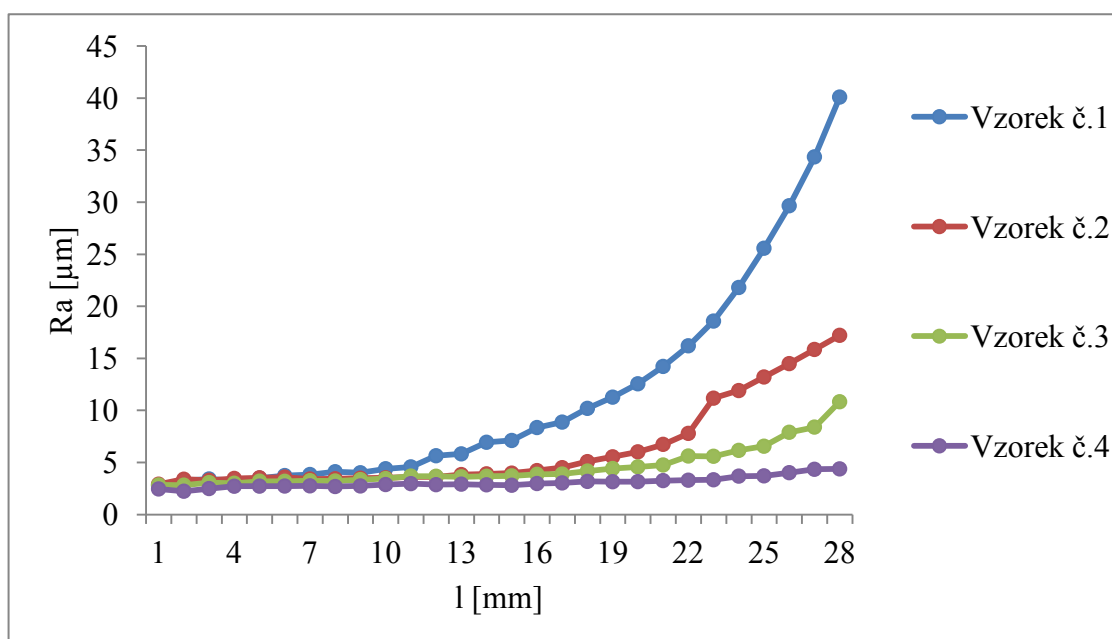
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q4.

## 5.9 Porovnání vzorků

**Nejvyšší výška profilu  $R_z$ :**a) Pro hmotnostní průtok abraziva  $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ Graf 5.9.1 Nejvyšší výšky profilu  $R_z$ b) Pro hmotnostní průtok abraziva  $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ Graf 5.9.2 Nejvyšší výšky profilu  $R_z$

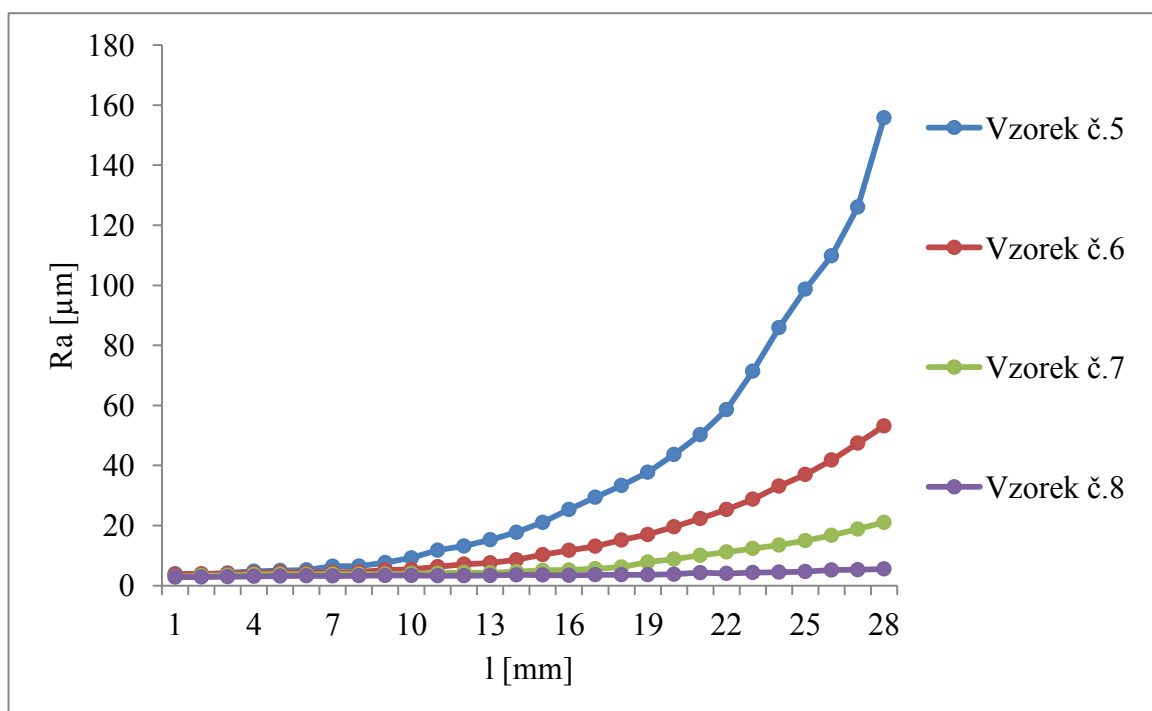
**Průměrná aritmetická úchylka  $R_a$ :**

a) Pro hmotnostní průtok abraziva  $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$



Graf 5.9.3 Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$

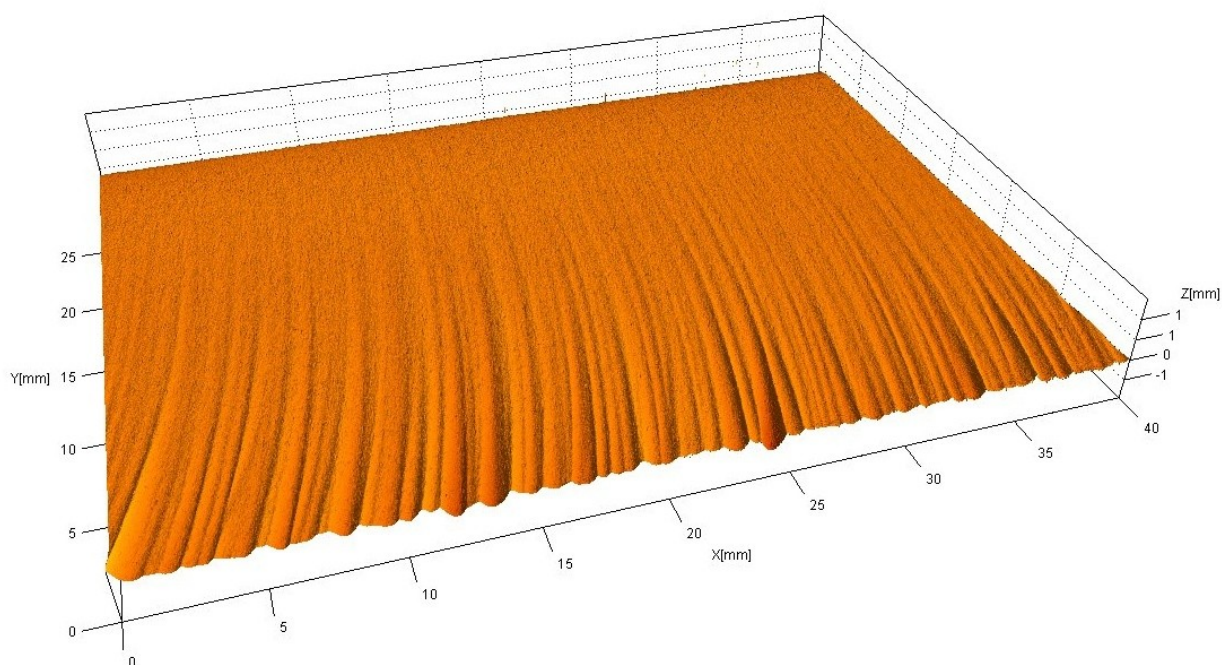
b) Pro hmotnostní průtok abraziva  $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$



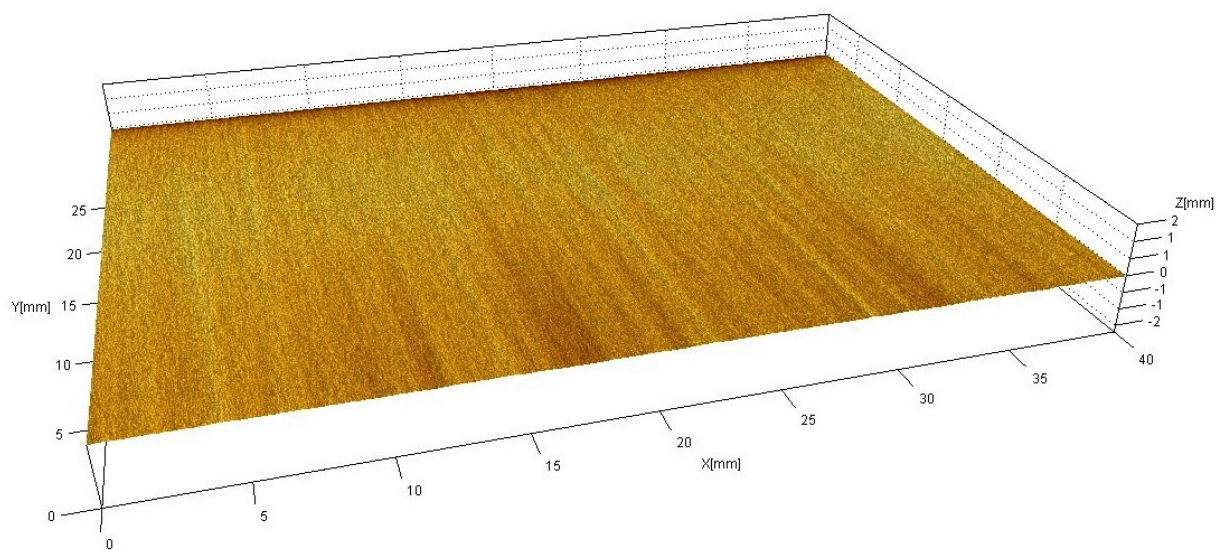
Graf 5.9.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$

**Porovnání topografie povrchu – vliv rychlosti řezání na vzhled plochy:**

- a) Zkušební vzorek č. 1 (tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva  $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , rychlost řezání  $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )



- b) Zkušební vzorek č. 4 (tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva  $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , rychlost řezání  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )



## 6 Diskuse výsledků

Z uvedených výsledků je zřejmé, že tvar řezné plochy po řezání abrazivním vodním paprskem je podobný plochám řezaným i jinými paprskovými metodami (laser, plasma). V horní části (v místě vstupu paprsku) je plocha téměř hladká bez výraznější vlnitosti. Drsnost povrchu zde dosahuje nejnižších hodnot. Se vzrůstající vzdáleností od vstupní hrany se zvyšuje vlnitost i drsnost plochy a je zřejmé, že se paprsek v řezu ohýbá proti směru řezného pohybu. Drsnost plochy v dolní části, kde paprsek opouští materiál, je největší.

Řezná rychlost má podstatný vliv na drsnost povrchu zejména v dolní části plochy. Při nízké řezné rychlosti ( $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) se drsnost v horní a dolní části plochy příliš neliší a se vzdáleností od vstupní hrany vzrůstá jen nepatrně. Při nejvyšší zkoumané rychlosti ( $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) je pak rozdíl v drsnosti mnohonásobně větší (obr. 5.9.1 až 5.9.4). Při nízké rychlosti se také paprsek méně ohýbá a je tudíž schopen lépe prořezat materiál i ve spodní části. Je zřejmé, že pro dosažení kvalitní plochy řezu v celé ploše (kvalita Q5 případně Q4) je nutno podstatně snížit rychlost řezání.

Nižší hmotnostní průtok abraziva se projevuje ve vyšší drsnosti v celé ploše. Ve spodní části řezné plochy bylo dosaženo 3 – 4x větší hodnoty  $Ra$  při nižším průtoku ( $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ) v porovnání s vyšším průtokem ( $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Lze konstatovat, že vyšší hmotnostní průtok abraziva přispívá ke kvalitnějšímu povrchu.



## **Závěr**

Cílem mé bakalářské práce bylo zhodnotit řezné plochy po dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Tohoto cíle bylo dosaženo měřením, interpretací a analýzou naměřených dat.

V teoretické části jsem se zmínil o některých nekonvenčních metodách obrábění. Jednotlivé metody jsem stručně popsal a naznačil fyzikální principy, na nichž fungují. Uvedl jsem také podstatné výhody a nevýhody každé metody. Blíže jsem se věnoval technologii vysokorychlostního vodního paprsku a zařízením používaným ke generování a řezání paprskem. V závěru teoretické části jsem nekonvenční metody obrábění porovnal podle vybraných parametrů při řezání materiálu.

V experimentální části jsem popsal přípravu zkušebních vzorků pro hodnocení kvality řezné plochy a způsob měření a vyhodnocování plochy po dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. V příslušné části jsem uvedl výsledky experimentů a stručně je zhodnotil.

Hlavním výsledkem práce je zjištění, že zkoumané parametry vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku (řezná rychlost a hmotnostní průtok abraziva) mají podstatný vliv na drsnost a kvalitu řezné plochy. Při použití vysoké řezné rychlosti je dosaženo horších kvalit povrchu, než při použití malé rychlosti. Podobně nižší hmotnostní průtok abraziva zhoršuje výslednou drsnost a kvalitu řezné plochy.

Zadáním správných vstupních hodnot řezání (obrábění) lze výrazně ovlivnit výslednou kvalitu povrchu obrobku i výrobní časy. Tím lze ovlivnit ekonomické ukazatele a produktivitu práce při výrobě. Před vlastním řezáním je tak nutno stanovit, jaká kvalita řezné plochy je požadována, a podle toho se nastaví příslušné parametry technologie.

## 7 Použitá literatura

- [1] ŘASA, JAROSLAV, PŘEMYSL POKORNÝ a VLADIMÍR GABRIEL. *STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. díl*. 2. vydání. Praha 6 - Břevnov: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-336-3.
- [2] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ*. Druhé. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, prosinec 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [3] SADÍLEK, Marek. *NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ I*. 1. vydání. Otrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [4] TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 3. část. HUMÁR, Anton a Anton HUMÁR. *VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ* [online]. 2005 [cit. 2013-12-29]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvenčni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvenčni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
- [5] BRYCHTA, Josef. *OBRÁBĚNÍ I: Návod pro cvičení 2. část*. 2. vydání. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2004. ISBN 80-248-0577-4.
- [6] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE*. 1. vydání. Havlíčkův Brod: FRAGMENT, 1998. ISBN 80-7200-296-1.
- [7] Nekonvenční metody obrábění. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenčni-metody-obrabeni-2-2.html>
- [8] Non Traditional Manufacturing Processes. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z: [http://www.turnxon.com/articles/articles\\_5.html](http://www.turnxon.com/articles/articles_5.html)
- [9] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE. Technologie II. 2. díl*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)
- [10] Nekonvenční metody obrábění - 6. díl: 6 Obrábění paprskem elektronů. [online]. [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenčni-metody-obrabeni-2.html>



[11] Nekonvenční metody obrábění – 4. díl: 5 Obrábění paprskem fotonů – laserem. [online]. [cit. 2014-02-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

[12] Speciální metody obrábění: Obrábění ultrazvukem. [online]. [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: [http://jhamernik.sweb.cz/Specialni\\_metody.htm](http://jhamernik.sweb.cz/Specialni_metody.htm)

[13] BULLEN: Ultrasonic Machining. [online]. [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://www.bullentech.com/ultrasonic-machining>

[14] AKROS: Technické informace. [online]. [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://www.akros.cz/technicke-informace-226/menu/>

[15] INOX, spol. s r. o. - PRODEJ NEREZOVÉHO MATERIÁLU INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL: NEREZOVÁ OCEL 1.4301. [online]. [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://inoxspol.cz/index.php?act=a&cat=4&art=16>

[16] ŠVERCL, Josef. *Technické kreslení a deskriptivní geometrie: PRO ŠKOLU A PRAXI*. 1. vydání. Praha 5 – Smíchov: SCIENTIA, spol. s r. o., 2003. ISBN 80-7183-297-1.

[17] STEINER, MARTIN. *SOUČASNÝ STAV A BUDOUCNOST NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU V PODMÍNKÁCH PRŮMYSLU ČESKÉ REPUBLIKY*. Brno, 2008. Dostupné

z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=4908](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4908).

Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. Vedoucí práce Ing. KAREL OSIČKA.

[18] ZELENÁK, Michal. *Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace*. Ostrava, 2012. Dostupné

z: [http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/96295/ZEL075\\_HGF\\_P1701\\_1702V001\\_2012.pdf?sequence=1](http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/96295/ZEL075_HGF_P1701_1702V001_2012.pdf?sequence=1). Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Aplikovaná fyzika. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

[19] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting). [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>

[20] BILÍK, Oldřich. *Obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2002, 2 sv. ISBN 80-7078-811-91.

[21] Vodní paprsek. [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>

[22] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.

[23] FLOW: Resources. [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.flowasia.com/waterjet-resources.cfm-id=335.htm>

[24] Využití plazma v technologii: 1. Díl. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/vyuziti-plazma-v-technologie-1-dil/>

[25] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>

[26] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobu (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.

[27] SPECIÁLNÍ METODY OBRÁBĚNÍ: Přednáška č. 14: Obrábění vodním paprskem a laserem. POPOV, Alexey a Jan JERSÁK. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: [http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM\\_SMO\\_PR\\_14\\_CZE\\_Popov-Jersak\\_Obrabeni\\_vodnim\\_paprskem\\_a\\_laserem.pdf](http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_SMO_PR_14_CZE_Popov-Jersak_Obrabeni_vodnim_paprskem_a_laserem.pdf)

[28] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. MM Průmyslové spektrum: Nekonenční metody obrábění 9. díl. [online]. [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-9-dil.html>

[29] 1 Laserové a plazmové řezání (84,83): laserové řezání - 84. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>

[30] YOUSSEF, Helmi A a Hassan EL-HOFY. *Machining technology: machine tools and operations*. Boca Raton: CRC Press, c2008, xxxvi, 633 p. ISBN 14-200-4339-0.

Dostupné

z:

[http://books.google.cz/books?id=IleBqfaGK1oC&printsec=frontcover&dq=isbn:1420043404&hl=cs&sa=X&ei=E\\_JwU9OjJuOg4gSK-IC4Dg&ved=0CDIQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=IleBqfaGK1oC&printsec=frontcover&dq=isbn:1420043404&hl=cs&sa=X&ei=E_JwU9OjJuOg4gSK-IC4Dg&ved=0CDIQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false)